

Erkki Mäkinen (toim.)

**Tietojenkäsittelytieteellisiä tutkielmia
Syksy 2014**



INFORMAATIOTIETEIDEN YKSIKKÖ
TAMPEREEN YLIOPISTO

INFORMAATIOTIETEIDEN YKSIKÖN RAPORTTEJA 34/2014

TAMPERE 2014

TAMPEREEN YLIOPISTO
INFORMAATIOTIETEIDEN YKSIKKÖ
INFORMAATIOTIETEIDEN YKSIKÖN RAPORTTEJA 34/2014
JOULUKUU 2014

Erkki Mäkinen (toim.)

**Tietojenkäsittelytieteellisiä tutkielmia
Syksy 2014**

INFORMAATIOTIETEIDEN YKSIKKÖ
33014 TAMPEREEN YLIOPISTO

ISBN 978-951-44-9703-2 (pdf)

ISSN-L 1799-8158
ISSN 1799-8158

Sisällysluettelo

Automaattisen kuva-analyysin hyödyntäminen kohdunkaulan syövän seulonnessa.....	1
<i>Mikko Itäranta</i>	
Tekoälyn toiminnan valinta videopeleissä.....	18
<i>Juuso Kaitila</i>	
Kappaleen haku digitaalisesta kuvasta konenäön avulla.....	40
<i>Santeri Karjalainen</i>	
Toiveet täyttävä lomake – Katsaus sähköisiin lomakkeisiin ja niiden käytettävyyteen	64
<i>Joonas Kemppainen</i>	
Katsaus steganografiaan.....	76
<i>Pauliina Kiviranta</i>	
Tiedonlouhinta web-hakukoneiden lokeista infodemiologisen tutkimuksen menetelmänä.....	96
<i>Tuuli Kähkönen</i>	
Fysiologisten signaalien pohjalta tapahtuva stressin tunnistaminen ja stressin hallintaa tukevat järjestelmät.....	110
<i>Marko Lehtonen</i>	
Teknostressi organisaatioissa: teknostressin aiheuttajat, ilmenemistavat ja vähentäminen.....	128
<i>Birgitta Logrén</i>	
Web-tiedonlouhinnan hyödyntäminen internetmainonnassa.....	143
<i>Anni Moilanen</i>	
Tietotekniikka urheiluvalmennuksessa.....	163
<i>Joonas Suves</i>	
Katseenseuranta markkinoinnin tutkimusmenetelmänä.....	179
<i>Heikki Tammisalo</i>	
Toimittajalukkiutuminen tietojärjestelmähankinnassa.....	196
<i>Julius Torkkeli</i>	

Automaattisen kuva-analyysin hyödyntäminen kohdunkaulan syövän seulonnassa

Mikko Itäranta

Tiivistelmä.

Kohdunkaulan syöpä on yksi yleisimmistä naisten syöivistä. Syövän tunnistaminen varhaisessa vaiheessa on mahdollista gynekologiseen irtosolunäytteeseen eli Papa-näytteeseen perustuvilla väestön massaseulonnoilla. Käsityönä tapahtuva seulonta on kuitenkin aikaa vievää ja kallista, mikä on tehnyt seulonnan automatisoinnista kiinnostavan tutkimuskohteen. Erilaisia yrityksiä seulonnan automatisoimiseksi on tehty jo 1950-luvulta lähtien. Tässä tutkielmassa kuvataan automaattisen kuva-analyysin hyödyntämismahdollisuuksia gynekologisten irtosolunäytteiden seulonnassa.

Avainsanat ja -sanonnat: Kliininen patologia, kohdunkaulan syöpä, Papa-koe, konenäkö, hahmontunnistus, automaattinen kuva-analyysi.

1. Johdanto

Kliininen patologia eli kudokset ja solunäytteiden analysointi lääketieteellisen diagnoosin avuksi on ytimeltään kuvien luokittelua ja tulkintaa. Digitaalisen kuvankäsittelyn ja automaattisen kuva-analyysin alalla tapahtuneesta huomattavasta teknisestä kehityksestä huolimatta automaation käyttöönotto patologian laboratorioissa on osoittautunut hitaaksi, ja patologia on yhä hyvin pitkälle käsityötä, jossa patologi mikroskopoi ja analysoi näytteen silmämääräisesti. Yrityksiä patologian automatisoimiseksi on tehty 1950-luvulta lähtien [Mellors and Silver, 1951], mutta projekteilla on ollut tapana epäonnistua joko teknisesti tai kaupallisesti [Bengtsson, 2003].

Gynekologiseen irtosolunäytteeseen eli niin sanottuun Papa-kokeeseen perustuva kohdunkaulan syövän seulonta aloitettiin 1940-luvulla, ja siitä on tullut kansanterveydellinen menestystarina. Järjestelmälliset väestöseulonnat tuottavat kuitenkin valtavia näytemassoja, eikä alkuvaiheessa pidetty taloudellisesti mahdollisena kouluttaa riittävää määrää sytologeja ja rahoittaa väestön massaseulontoja. Tämä herätti kiinnostuksen seulonnan automatisoimiseen. Toimivan kaupallisen tuotteen tuloa markkinoille saatiin kuitenkin odottaa yli 40 vuotta. [Bengtsson and Malm, 2014]

Tässä tutkielmassa keskitytään pohtimaan tietokoneavusteisen kuva-analyysin käyttöä kohdunkaulan syövän automaattisessa seulonnassa. Aluksi käsitel-

lään seulonnan historiaa. Luvussa 3 kuvataan seulontaongelman erityispiirteitä kuva-analyysin ja hahmontunnistuksen kannalta. Luvussa 4 esitellään tarkemmin Suomessakin käytössä olevan PAPNET-järjestelmän toimintaa. Luvussa 5 esitellään lyhyesti muita lähestymistapoja. Lopuksi pohditaan hieman mahdollisia syitä automaation kangertelevaan käyttöönottoon sekä tietokoneavusteisten menetelmien tulevaisuutta alalla.

2. Kohdunkaulan syövän seulonta

Kohdunkaulan syöpä on rintasyövän jälkeen maailman toiseksi yleisin naisten syöpätauti. Kohdunkaulan syövän keskeisin taustatekijä on ihmisen papilloomavirus (HPV) [Aho et al., 2010]. Kohdunkaulan syövän esiintyvyys vaihtelee suuresti eri osissa maailmaa. Esimerkiksi Afrikassa esiintyvyys on noin 25 tapausta 100 000 asukasta kohti vuodessa, kun taas Suomessa vastaava luku on 3,7 [Bengtsson and Malm, 2014]. Suurin yksittäinen syy eroon esiintyvyydessä on väestön massaseulonta. Tämä seulonta on Suomessa käynnistynyt 1960-luvulla, ja sen ansiosta kohdunkaulan syövän esiintyvyys maassamme on vähentynyt 80 % [Tiitinen, 2014].

2.1. Papa-koe

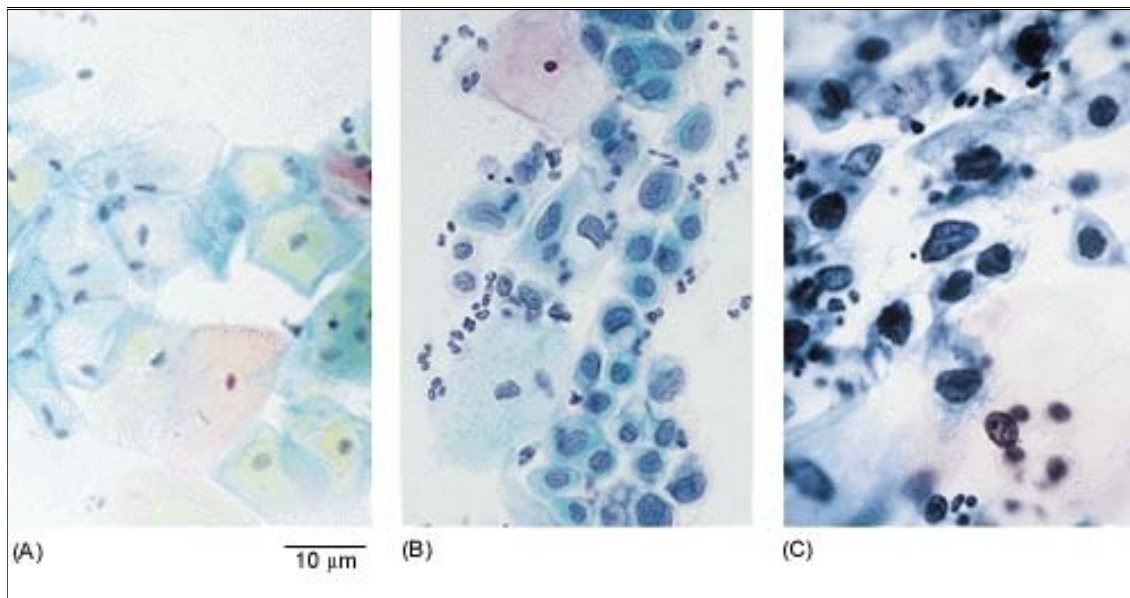
Papa-koe eli gynekologinen irtosolukoe on kreikkalaisen lääkärin Georgios Papanikolaoun mukaan nimetty menetelmä, jota käytetään kohdunkaulan syöpien varhaiseen tunnistamiseen. Suomalaiset naiset saavat kutsun Papa-seulontaan viiden vuoden välein 30–60 vuoden iässä.

Menetelmässä kohdunkaulasta otetaan solunnäyte käyttäen sivellintä tai lastaa. Näyte siirretään näytelasille ja värjätään käyttäen Papanikolaou-menetelmää [Papanicolaou and Traut, 1943]. Värjäämisen avulla solujen ominaisuudet saadaan paremmin näkyviin mikroskoopissa. Papa-seulontojen tarkoituksena on löytää vaaralliset solumuutokset ennen niiden kehittymistä kohdunkaulan syöväksi.

Löydökset luokitellaan nykyisin niin sanotun *Bethesda-järjestelmän* mukaisesti normaalisoluihin, hyvänlaatuisiin solumuutoksiin ja eriasteisiin dysplastisiin muutoksiin [HUSLAB, 2014]. Dysplastiset solut ovat soluja, joita voidaan pitää syövän esiasteina.

Kuten kuvasta 1 nähdään, on dysplastisten solujen tuma yleensä suurempi ja tummempi kuin terveissä soluissa, ja soluilla on taipumus takertua toisiinsa rypäiksi. Lievä dysplasia ilmenee suurentuneina mutta vaaleina tumina. Keski- vaikeasti dysplastisten solujen tuma on tummempi ja suurempi, ja tumassa voi

olla epämuodostumisen merkkejä (granuloitumista). Vaikeasti dysplastisten solujen tuma on suuri, tumma ja usein epämuodostunut. Lisäksi solulima on tummaa, ja sitä on vähän verrattuna tuman tilavuuteen. [Ampazis et al., 2004]



Kuva 1. Normaaleja soluja (A), lievä dysplasia (B), syöpäsoluja (C). Taustalla näkyy valkosolukasaumia.

2.2. Automaattisten seulontajärjestelmien historiaa

Automatisoinnin potentiaaliset hyödyt irtosolunäytteiden seulonnassa ovat kahtalaiset. Ensinnäkin väestön massaseulonnat tuottavat valtavia näytemääriä, joiden diagnosointi käsityönä on kallista ja hidasta. Toiseksi, kuva-analyysin avulla voidaan saada näytteistä kvantitatiivista tietoa tutkimuksen tarpeisiin, esimerkiksi tietoa DNA:n määrästä solussa. Patologin silmämääräinen diagnoosi, joka on aina subjektiivinen, ei tällaista kvantitatiivista tietoa tuota.

Jo 1930-luvulla huomattiin, että fotometrisillä menetelmillä voitiin mitata DNA:n ja RNA:n määrää solussa [Bengtsson, 2003]. Tämä herätti toiveen, että syöpäsolut voitaisiin erottaa terveistä soluista yksinkertaisella DNA:n määrän mittauksella. Valitettavasti hyvin pian kävi ilmi, että DNA:n määrä vaihtelee huomattavasti sekä terveissä että syöpäsoluissa, joten tämä lähestymistapa osoittautui umpikujaksi.

1950-luvulla käynnistynyt Cytoanalyzer-projekti [Public Health rep., 1957] tuotti ensimmäisen automaattisen järjestelmän syöpäsolujen seulontaan. Laite perustui analogiseen kuvankäsittelyyn ja pyrki tunnistamaan epänormaalit solut tuman koon sekä optisen tiheyden perusteella. Laite osoittautui kuitenkin kalliiksi ja tehottomaksi. Se ei pystynyt erottamaan syöpäsoluja näyteartefak-

teista, eli esimerkiksi verisolukasaumista tai kudossäätteistä näytteessä. Cyto-analyzer-projekti hyllytettiin 1960-luvun alussa, ja projektin epäonnistuminen loi automaatiolle huonon maineen yhdysvaltalaisen sytologien piirissä vuosikymmeniksi.

1960- ja 1970-luvuilla kehitettiin Yhdysvalloissa, Euroopassa ja Japanissa kuitenkin useita sytoanalyttisiä prototyyppijärjestelmiä. Näitä olivat muun muassa Cytoanalyzeriin perustunut CYDAC, yhdysvaltalainen TICAS, hollantilainen LEYTAS, ranskalainen SAMBA ja ruotsalainen CELLO. 1980-luvulla kehitettyjä järjestelmiä olivat BioPEPR, FAZYTAN, CERVISCAN sekä DIASCANNER [Bengtsson, 2003]. Osa näistä järjestelmistä kykeni jo vastaavaan tarkkuuteen ja herkkyyteen kuin käsityönä tehtävä sytologia, mutta yksikään järjestelmistä ei edennyt kaupalliseksi tuotteeksi asti.

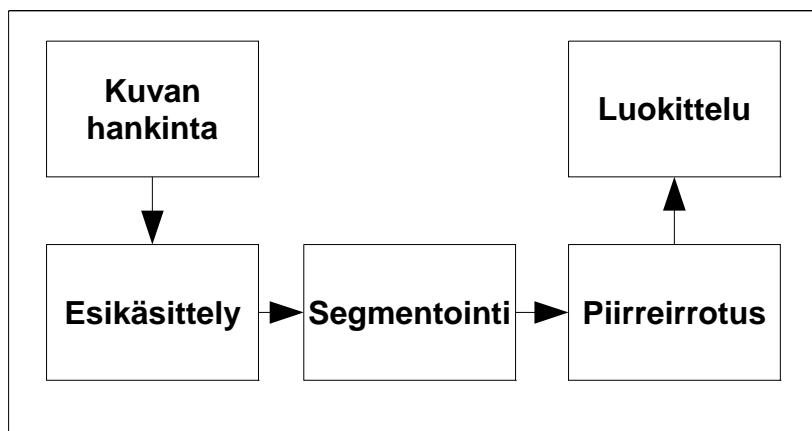
1980-luvun lopulla käynnistyi Yhdysvalloissa useita suuria projekteja sytologian automatisoinniksi. Gynekologisten irtosolunäytteiden valmistelussa tapahtui kehitystä: nestesytoologisella ThinPrep-menetelmällä saatiin aikaiseksi konenäön kannalta laadukkaampia näytteitä. Myös AutoCyte-yhtiö toi markkinoille vastaavan nestesytologisen menetelmän. PAPNET-esiseulontajärjestelmä [Mango, 1994] käytti perinteisiä näytteiden valmistelumenetelmiä, ja hyödynsi neuroverkkopohjaista luokittelua syöpäsolujen tunnistamiseen. Tämä järjestelmä oli ensimmäisiä, joka käytti neuroverkkoja suuressa kaupallisessa sovelluksessa. AutoPap-järjestelmä [Lee et al., 1998] oli samankaltainen kuin PAPNET; myös se käytti perinteisesti valmisteltuja näytteitä ja neuroverkkopohjaista luokittelua. Yhdysvaltalainen AccuMed International hankki oikeudet ruotsalaiseen DIASCANNER-järjestelmään ja toi markkinoille tähän perustuvan kaupallisen tuotteen.

1990-luvulla tapahtuneiden yritysfuusioiden ja konkurssien seurauksena markkinoille jäi enää yksi toimija, jolla oli FDA:n hyväksynnän saanut automaattiseen kuva-analyysiin perustuva solunäytteiden seulontajärjestelmä. NeoPath, NeuroMedical ja AutoCyte yhdistyivät TriPath-yhtiöksi, jonka myöhemmin hankki omistukseensa BD Diagnostics [BD Diagnostics, 2014]. Järjestelmän nimi oli FocalPoint, ja se perustui hyvin pitkälle AutoPap 300 -järjestelmään. Järjestelmää myydään yhä, joten pitkän tutkimustyön jälkeen markkinoilla on vihdoinkin toimiva tietokoneavusteinen järjestelmä Papa-näytteiden seulontaan. Järjestelmä on nykyiseltä nimeltään BD FocalPoint Slide Profiler. Kirjallisuudessa järjestelmään viitataan yhä yleisesti vanhalla nimellä AutoPap [MSAC, 2003].

3. Papa-näytteiden seulonta kuva-analyysitehtävänä

Erilaisiin kuva-analyysin ja hahmontunnistuksen luokittelutehtäviin sovelletaan yleisesti kuvan 2 mukaista vaihejakoa. *Kuvan hankinta* tarkoittaa kuvadatan hankintaa fyysisestä kohteesta kameran, skannerin tai muun apuvälineen avulla. *Esikäsittelyssä* kuvaa korostetaan siten, että kiinnostavat kohteet saadaan paremmin näkyviin. *Segmentoinnin* avulla kuvasta erotetaan kiinnostavat kohteet tai alueet. *Piirreirrotuksella* tarkoitetaan analyysitehtävässä hyödyllisten piirteiden (esimerkiksi koko, tummuus tai kaarevuus) mittaamista segmentoiduista kohteista. Piirreirrotus voidaan myös nähdä eräänlaisena ulottuvuuk-sien vähentämisenä. *Luokitteluvaiheessa* kuvasta segmentoituja kohteita ja niiden piirteitä hyödynnetään kohteiden tunnistamiseen tai luokitteluun.

Papa-näytteiden seulonnassa tehtävänä on luokitella näytteen solut jonkin dysplasialuokituksen mukaan ja merkitä korkean luokituksen saaneet näytteet, jotta patologi voi tarkastaa näytteen ja tehdä lopullisen diagnoosin. Menetelmä ei myöskään saa olla herkkä näyteartefakteille kuten verisolukasaumille. Seuraavassa on esitetty Papanäytteiden seulontaongelman erityispiirteitä ja käytettyjä menetelmiä kunkin kuva-analyysin vaiheen osalta.



Kuva 2. Kuva-analyysitehtävän vaiheet.

3.1. Kuvan hankinta

Seulontatehtävässä tarvittavan kuvadatan hankinta perustuu automaattisiin mikroskooppeihin. Tyypillisessä ratkaisussa automatisoitu alusta tai robottikäsi siirtää näytelaseja mikroskoopin alla, ja mikroskooppiin liitetty digitaalinen kamera tai skanneri kuvaa näytteet mikroskoopin läpi. Tässä työssä näytteiden digitointia kutsutaan *skannaukseksi* käytetystä laitteistosta riippumatta. Kirjal-

lisuudessa sanalla *skanneri* usein viitataan myös kokonaiseen automaatiojärjestelmään.

Bengtsson ja Malm [2014] tunnistavat Papa-näytteiden skannauksessa kolme keskeistä haastetta. Ensinnäkin datamäärät ovat suuria. Esimerkiksi 25×50 mm:n kokoisen näytteen skannaaminen tarvittavalla 0,2 mikrometrin resoluutiolla tuottaa noin 31 gigapikseliä kuvadataa. Linssien optinen erottelukyky ei riitä kokonaisen näytteen kuvaamiseen kerralla tällä resoluutiolla, eikä pikselimäärältään riittävän suuria kuvasensoreita (kennoja) ole olemassa. Suuren datamäärän asettamaa haastetta voidaan yrittää ratkaista moniresoluutiotekniikalla. Näytteet voidaan kuvata ensin pienempitehoisella objektiivilla, tunnistaa kiinnostavat alueet, ja kuvata nämä sitten suuritehoisemmalla objektiivilla.

Edellä mainituista syistä näyte joudutaan kuvaamaan osissa, mistä seuraa toinen haaste: skannaukseen kuluva aika. Jos näytelaseja joudutaan toistuvasti siirtämään ja pysäyttämään mikroskoopin alla, voi suurten näytemäärien digitointi viedä kohtuuttoman paljon aikaa. Yksi tapa vastata tähän haasteeseen on pitää näytelasit jatkuvassa liikkeessä ja ottaa salamavalon avulla useita kuvia lyhyellä valotusajalla. Toinen tapa on käyttää yksiulotteista anturiliuskaa, joka kuvaa yhden rivin pikseleitä näytteiden ollessa jatkuvassa liikkeessä.

Kolmas ongelma on kuvien tarkennus (fokusointi). Vaikka näyte on ohut, on se solujen mittakaavassa kolmiulotteinen, ja mikroskooppi on tarkennettava automaattisesti halutulle kuvatasolle. Tarkennustaso ei myöskään ole sama näytteen eri osissa. Erityisesti solujen ja tumien tekstuuriin perustuvat luokittelumenetelmät vaativat mahdollisimman tarkkoja kuvia. Ongelma voidaan ratkaista monifokustekniikalla, jossa otetaan useita kuvia ja valitaan näistä paras. Tähän voidaan yhdistää moniresoluutiotekniikkaa: näyte voidaan aluksi kuvata pienemmällä suurennoskertoimella oikean tarkennustason selvittämiseksi näytteen eri osissa.

3.2. Esikäsittely

Käytetyt esikäsittely- ja kuvanparannusmenetelmät riippuvat käytetyistä segmentointi- ja luokittelualgoritmeista, joten niitä ei tässä käsitellä sen tarkemmin. Monille ratkaisuille yhteinen askel on kuitenkin RGB-värikuvien muuntaminen harmaasävykuviksi yhdistämällä punainen ja vihreä värikanava. Tämä perustuu siihen, että käytetyssä värjäysmenetelmässä solut ja tumat erottuvat sinisinä, joten hylkäämällä sininen kanava saadaan paras mahdollinen harmaasävykontrasti [Luck and Scott, 1993].

3.3. Segmentointi

Segmentointi nähdään usein kuva-analyysin kulmakivenä. *Solunsegmentoinnilla* tarkoitetaan kuvankäsittelyongelmaa, jossa mikroskooppikuvasta pyritään tunnistamaan ja erottamaan solujen sekä mahdollisesti niiden tumien rajat. Erik Meijering [2012] jakaa solunsegmentointimenetelmät niissä käytetyn lähestymistavan perusteella viiteen pääluokkaan.

Kynnystys tummuusasteen perusteella oli ensimmäisiä tapoja erottaa solut taustasta. Tämä menetelmä ei yksinään tuota hyviä segmentointituloksia, joten nykyisin sitä käytetään lähinnä esikäsittelyaskeleena.

Piirteentunnistuksella tarkoitetaan tässä reunantunnistukseen tai alueentunnistukseen (blob detection) perustuvia menetelmiä. Piirteentunnistuksen avulla on saatu parempia segmentointituloksia kuin intensiteettikynnystyksellä.

Morfologinen suodatus perustuu eroosio- ja dilaatio-operaatioihin sekä näiden yhdistelmiin. Esimerkiksi luvussa 4 kuvattu PAPNET-järjestelmä käyttää laajas- ti morfologisia operaatioita.

Alueen kasvatukseen perustuvissa menetelmissä kohdekuvasta valitaan siemenpisteitä, joita kasvatetaan iteratiivisesti, kunnes löydetään solun rajat. Esimerkiksi yleisesti käytetty vedenjakaja-algoritmi kuuluu tähän luokkaan.

Mukautuviin malleihin (deformable models) perustuvassa segmentoinnissa jotakin mallia (käyrää tai pintaa) muokataan iteratiivisesti, kunnes se minimoi jonkin ennalta määritellyn energiatermin, joka pohjautuu syötekuvaan ja mallin muotoon. Mukautuvien mallien käyttö segmentointiin on saanut huomiota 2000-luvun alusta lähtien.

3.4. Piirreirrotus

Kun solut tai tumat on löydetty ja rajattu, voidaan niistä mitata kvantitatiivisia *piirteitä*. Syöpäsolujen tuma on suurempi, tummempi ja epäsäännöllisempi kuin terveiden solujen. Rodenacker ja Bengtsson [2003] ovat luokitelleet sytometriassa käytetyt piirteet kolmeen luokkaan.

Muotopiirteitä ovat erilaiset kohteen kokoa ja muotoa kuvaavat mittarit. Yksinkertaisimmillaan voidaan käyttää kohteen rajaavan nelikulmion kokoa. Monimutkaisempia muotopiirteitä ovat erilaiset kohteen konveksisuutta, elliptisyyttä tai rajan kaarevuutta kuvaavat mitat.

Intensiteetti- eli densitometriset piirteet kuvaavat kohteen tummuutta globaalisti. Koko kuvan keskimääräinen tummuusaste ei ole mittarina kovin hyödyllinen. Intensiteetti- piirteet pohjautuvatkin tummuusasteen laskemiseen erikseen

segmentoidun kohteen eri alueilta, kuten rajan sisä- ja ulkopuolelta sekä raja-alueen läheisyydestä.

Tekstuuri- ja rakennepiirteet perustuvat paikallisiin intensiteettieroihin. Tekstuurin ”epätasaisuutta” voidaan mitata esimerkiksi spatiaalisissa terävöityssuotimissa käytetyillä differenssioperaattoreilla, kuten gradientilla tai Laplace-muunnoksella. Kuvaan sovelletaan differenssioperaatiota, jolloin tulokuvan histogrammista voidaan arvioida alkuperäisen kuvan epäjatkuvuutta. Tämä perustuu siihen, että ”sileän” syötekuvan gradientti on tummempi kuin paljon epäjatkuvuuksia sisältävän syötekuvan.

3.5. Luokittelu

Papa-näytteistä löytyvien solumuutosten luokittelun pohjana on Bethesda-järjestelmä [Bengtsson and Malm, 2014]. Luokitteluvaiheessa segmentoidut kohteet pyritään lajittelemaan Bethesda-järjestelmän mukaisiin tai näihin pohjautuviin diagnostisiin kategorioihin niistä irrotettujen piirteiden perusteella. Useimmiten luokittelun perusteena ei käytetä yksittäistä piirrettä, vaan piirteiden yhdistelmää [Malm, 2013].

Vaihtoehtoinen luokittelustrategia on käyttää kuvadataa suoraan luokittelijan syötteenä, kuten esimerkiksi luvussa 4 kuvatun PAPNET-järjestelmän neuroverkkoihin pohjautuvassa luokittelijassa.

Myös lopullinen, sytoteknikon tai sytologin tekemä visuaalinen tutkimus voidaan nähdä osana luokitteluvaihetta.

3.6. Artefaktien tunnistaminen ja hylkääminen

Tyypillinen Papa-näyte sisältää 100 000–300 000 solua. Kohteiden suuresta määrästä seuraa, että pienikin osuus virheellisesti syöpäsoluiksi luokiteltuja kohteita johtaa koko näytteen luokitteluun positiiviseksi ja diagnoosin varmentamiseen käsityönä. [Bengtsson and Malm, 2014]

Seulonassa on siis tärkeää, että erilaiset näyteartefaktit kuten solurypäät, bakteerit tai verisolut pystytään tunnistamaan ja hylkäämään. Artefaktien hylkääminen voidaan nähdä osana luokitteluvaihetta. Malm [2013, pp. 67-71] kuvaa luokittelustrategian, joka kykenee tunnistamaan 99,57 % näyteartefakteista.

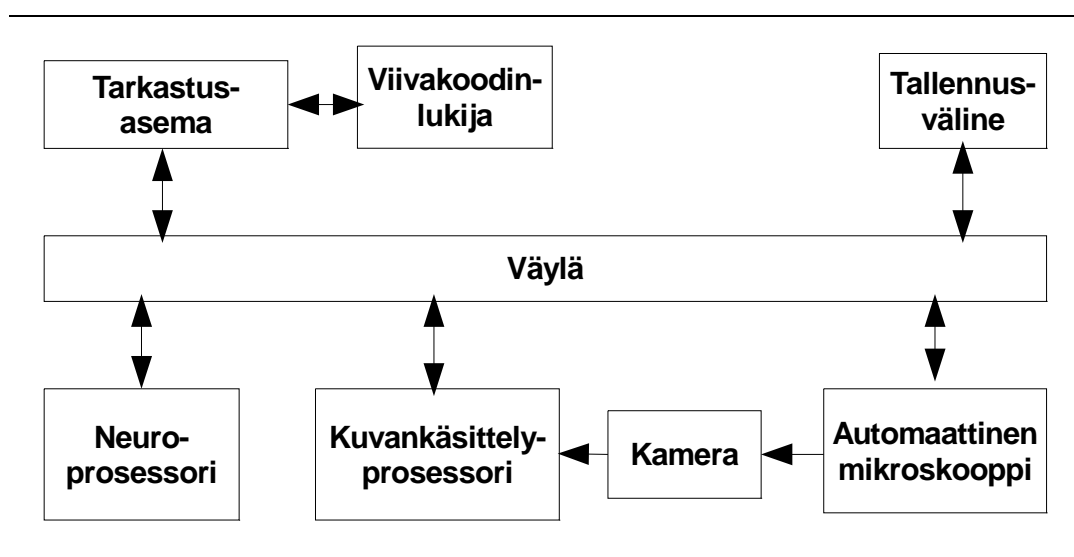
4. Esimerkki: PAPNET-esiseulontajärjestelmä

Neuromedical Systems -yhtiön 1990-luvun alussa markkinoille tuoma PAPNET [Mango, 1994; Luck and Scott, 1993; Rutenberg, 1990] on morfologisiin kuvankäsittelyoperaatioihin ja neurolaskentaan perustuva esiseulontajärjestelmä, jossa sytologi tekee lopullisen luokittelun. Järjestelmä on ollut käytössä myös Suomen kansallisessa kohdunkaulan syövän seulontaohjelmassa vuodesta 1999 [Kotaniemi-Talonen, 2009].

Syövän esiasteiden lisäksi PAPNET-järjestelmän löytämissä epäilyttävissä kohteissa on usein mukana myös mikrobeja sekä epänormaaleja soluja, joissa on herpesviruksen tai klamydian aiheuttamia solumuutoksia [Boon and Kok, 1995]. Joissain tapauksissa näiden löytyminen seulonnassa voi olla hyödyllistä, mutta harmittomien mikrobien löytymistä voidaan pitää myös puutteena.

4.1. Järjestelmän osat

PAPNET-järjestelmän osat on esitetty kuvassa 3. Järjestelmään kuuluu digitaalisen värikameralla varustettu automaattinen mikroskooppi, kuvankäsittelyprosessori, neuroverkkoprosessori sekä PC-pohjainen työasema kuvien visuaalista tutkimusta ja järjestelmän hallintaa varten. Järjestelmään kuuluu myös viivakoodinlukija näytelasien tunnistamista varten. Skanneri toimii ilman käyttäjän interaktiota, ja se voi käsitellä enimmillään sata näytelasia kerralla. Automaattisessa mikroskoopissa on kolme eritehoista objektiivia (suurennuskertoimiltaan 50×, 200× ja 400×), joita käytetään skannauksen eri vaiheissa.

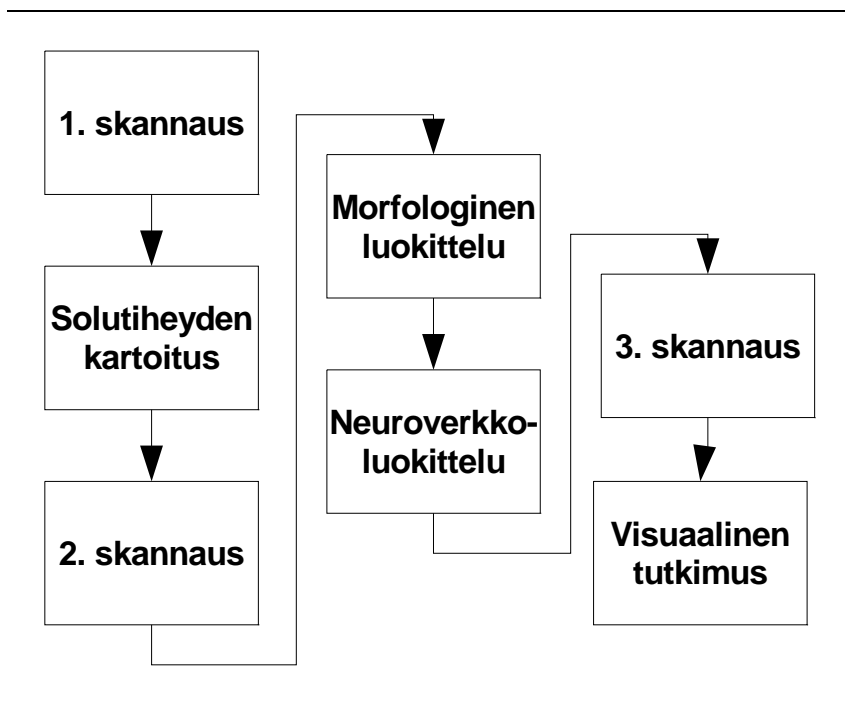


Kuva 3. PAPNET-järjestelmän osat.

4.2. Järjestelmän toiminta

Järjestelmän toiminnan vaiheet on esitetty kuvassa 4. Aluksi näytteen identiteetti varmistetaan lukemalla viivakoodi. *Esiskannauksessa* näytelasi kuvataan heikkotehoisimmalla objektiivilla, ja näytelasilta etsitään ne alueet, joilla on paljon soluja. Seuraavaksi tarkempi objektiivinen suunnataan kiinnostavimmille alueille, ja näin hankitut kuvat syötetään *morfologiselle luokittelijalle*, joka etsii tarkempaa tutkimusta vaativia kohteita. Morfologisen luokittelijan löytämien kohteiden kuvat syötetään *neuroverkkoluokittelijalle*, joka valitsee kiinnostavimmat kohteet. Sytologi tekee lopullisen luokittelun visuaalisesti.

Skanneri käyttää noin kymmenen minuuttia yhden näytteen tutkimiseen. Järjestelmä käyttää tavanomaiseen tapaan valmisteltuja irtosolunäytteitä, joissa yhdellä näytelasilla voi olla noin 300 000 solua.



Kuva 4. Näytteen tutkimisen vaiheet PAPNET-järjestelmässä.

4.3. Esiskannaus ja solutiheyden kartoitus

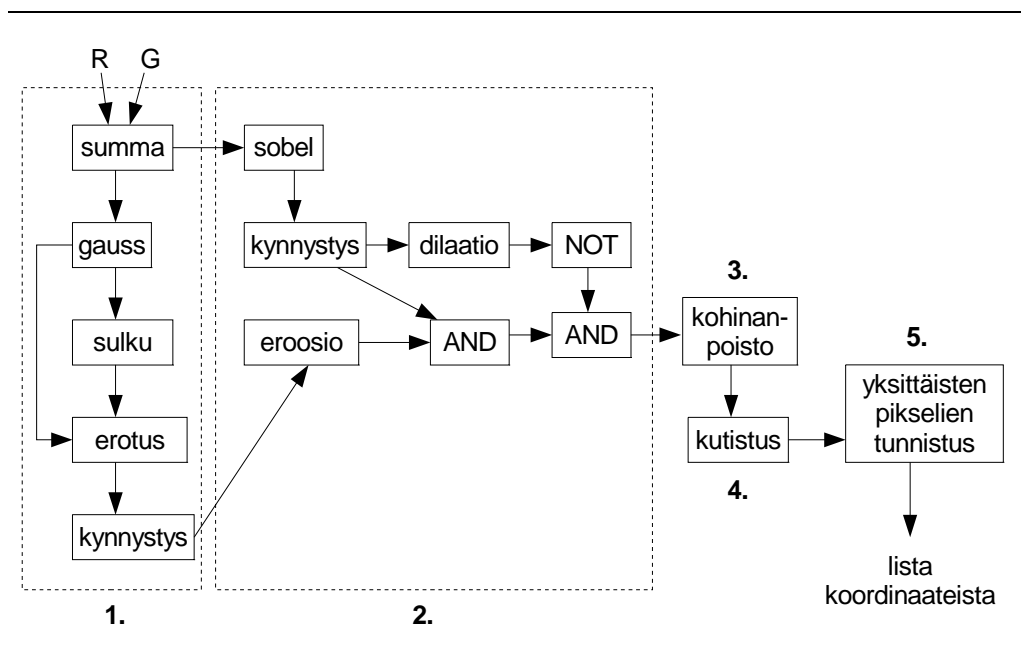
Esiskannauksessa näytelasin pinta jaetaan ruudukkomaisesti osiin (blokkeihin), ja kukin blokki kuvataan erikseen heikkotehoisimmalla objektiivilla. Tällä ensimmäisellä skannauksella on kaksi tarkoitusta. Ensimmäinen sillä selvitetään mikroskoopin oikea tarkennustaso näytteen eri osissa, jolloin mikroskoopin tarkennus myöhempien skannausvaiheiden aikana nopeutuu. Toiseksi, esiskan-

nauksen tuottamille kuville tehdään *solutiheyden kartoitus*, ja vain vähän soluja sisältävät näytteen osat hylätään myöhemmistä skannausvaiheista, mikä nopeuttaa näytteen käsittelyä huomattavasti. Kyse on siis moniresoluutiotekniikan hyödyntämisestä käsittelyn nopeuttamiseen ja datamäärän pienentämiseen.

4.4. Toinen skannaus ja morfologinen luokittelu

Solutiheydeltään riittävät blokit kuvataan uudelleen 200-kertaisella suurennoksella. Näin hankitut kuvat muutetaan harmaasävykuviksi yhdistämällä punainen ja vihreä värikanava ja syötetään morfologiselle luokittelijalle, joka tunnistaa näytelasilta 10 000-80 000 kiinnostavinta kohdetta. Morfologinen luokittelija tuottaa listan epäilyttävien solujen tumien keskipisteiden pikselikoordinaateista. Luokittelija perustuu intensiteettikynnestykseen sekä morfologisiin kuvankäsittelyoperaatioihin eli dilaatio- ja eroosio-operaatioihin.

Luokittelun lähtökohtana on se, että epäilyttävien tumien summittainen koko ja tummuusaste tunnetaan. Morfologisilla operaatioilla voidaan suodattaa syötekuvasta pois liian pienet tai suuret kohteet. Esimerkiksi pienten, tummien kohteiden suodattamiseen käytetään *morfologista sulkua*. Kuvaan sovelletaan toistuvasti dilaatio-operaatiota, jolloin pienet kohteet katoavat. Tämän jälkeen sovelletaan eroosio-operaatiota, jolloin jäljelle jääneet kohteet palautuvat likimäärin alkuperäisen kokoisiksi. Tummuusasteeltaan vääränlaiset kohteet suodatetaan pois yksinkertaisella intensiteettikynnestyksellä.



Kuva 5. Morfologisen luokittelun vaiheet.

Morfologinen luokittelu voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin, joita on havainnollistettu kuvassa 5:

1. **Poistetaan liian suuret ja tummuudeltaan vääränlaiset kohteet.** Aluksi syötekuva esikäsitellään Gaussin suodattimella. Tämän jälkeen suoritetaan morfologinen sulku, eli dilaatio jota seuraa eroosio. Sulkuoperaation tulos vähennetään esikäsitelystä syötekuvasta, ja tulos kynnystetään binäärikuvaksi.
2. **Poistetaan liian pienet kohteet.** Syötekuvasta tunnistetaan reunat Sobel-operaattorilla, ja kuva kynnystetään binäärikuvaksi. Kuvaan sovelletaan dilaatio-operaatiota, jolloin pienet kohteet sulkeutuvat. Näin syntyneillä maskeilla voidaan poistaa liian pienet kohteet kuvasta.
3. **Poistetaan suola-pippuri-kohina.** Käsittelyn aikana erilaiset näyteartefaktit ja pienet kohteet voivat muuntua yksittäisiksi pikseleiksi. Nämä suodatetaan pois.
4. **Suoritetaan morfologinen kutistus.** Tässä vaiheessa kuvassa on jäljellä vain halutun kokoiset kohteet. Kutistusoperaation jälkeen kohteista jää jäljelle vain keskipisteet.
5. **Etsitään yksittäiset pikselit.** Tuloksena syntyy lista halutun kokoisten kohteiden pikselikoordinaateista.

Binäärimaskien muodostaminen voidaan nähdä eräänlaisena segmentointiopeeraationa. Toisaalta nämä maskit luodaan kynnystys- ja morfologisilla operaatioilla, jotka perustuvat kohteiden intensiteettiin ja kokoon. Näin ollen mitään kovin selkeää jakoa luvussa 3 kuvattuihin segmentointi-, piirreirrotus- ja luokitteluvaiheisiin ei tässä synny.

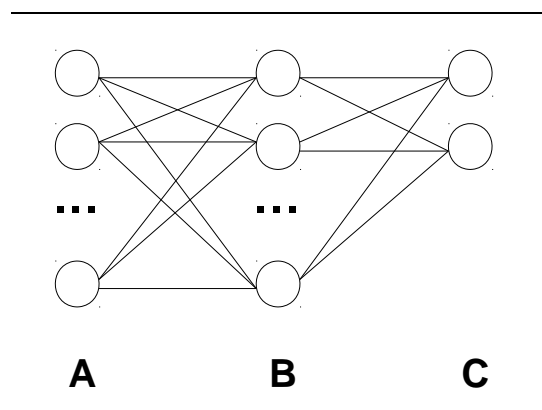
4.5. Neuroverkkoluokittelu

Morfologisen luokittelijan tuottamien koordinaattien perusteella erotetaan jokaisen epäilyttävän kohteen ympäriltä 24×24 pikselin kokoinen harmaasävykuva, jota käytetään neuroverkkoluokittelijan syötteenä. Tämä luokittelija perustuu myötäkytkettyyn takaisinlevittävään monikerroksiseen perseptroniverkkoon (MLP).

Luokittelija koostuu kahdesta MLP-verkosta, joista toinen on opetettu tunnistamaan yksittäisiä dysplastisia soluja, ja toinen epäilyttäviä solurypäitä. Verkot on opetettu ”tehtaalla” käyttäen opetusjoukkona sytologiien käsin koostamaa kuvakirjastoa. Järjestelmä ei siis tue online-oppimista. Käytetyissä ver-

koissa on kuvan 6 mukaisesti kolme kerrosta. Syötekerroksessa on syötekuvan pikselimäärää vastaava määrä neuroniyksiköitä, eli 576 yksikköä. Piilokerroksessa on yksiköitä noin neljäsosa tästä. Tuloskerroksessa on yksi tai muutamia tulosityksiköitä. Verkot on opetettu assosioimaan tulosarvo 0,1 terveiden solujen kuviin ja arvo 0,9 syöpäsolujen kuviin.

Verkon tulosteena on siis solun tai rypään ”epänormaaliutta” kuvaava numeroarvo välillä 0,1-0,9. Luokittelija lajittelee kohteet tämän numeroarvon perusteella ja listaa 64 epäilyttävintä kohdetta kummastakin kategoriasta.



Kuva 6. Kolmikerroksinen perseptroniverkko. A - syötekerros, B - piilokerros, C - tuloskerros.

4.6. Uudelleenskannaus ja visuaalinen tutkimus

Kolmas, viimeinen skannaus käyttää suuritehoisinta objektiivia ja tuottaa korkearesoluutioiset värikuvat niistä soluista ja solurypäistä, jotka saivat neuroverkkoluokittelijalta korkeimmat epänormaaliuslukemat. Korkeimmalle luokitellut 64 kohdetta kummankin neuroverkon luokittelemana kuvataan, yhteensä siis 128 kuvaa. Kuvat tallennetaan digitaalisesti ja niihin lisätään koordinaatit, joiden avulla sytologi voi tarvittaessa löytää kohteet näytelasilta mikroskooppila.

PAPNET-tarkastusasema on PC-pohjainen järjestelmä, jolla sytologi tutkii tarkemmin skannerin esivalitsemat 128 kuvaa. Käyttäjä voi selata ja suurentaa kuvia ja merkitä hiirellä lisätutkimuksia vaativat kohteet. Käyttäjä myös näkee kunkin kuvan näytelasikoordinaatit, ja voi käsityönä tarkastaa kohteet uudelleen tavallisella mikroskoopilla. Tarkastusasemalla sytologi merkitsee kohteet kolmijakoisesti *negatiivisiin* eli kohteisiin, jotka eivät vaadi lisätutkimuksia, *riittämättömiin* eli kohteisiin, jotka epäselvän kuvan takia täytyy tutkia käsityönä

mikroskoopilla, sekä *tarkastettaviin*, eli mahdollisiin epänormaaleihin soluihin, joiden tarkempi tutkimus tehdään käsin mikroskoopilla. Lopullinen diagnoosi tehdään aina mikroskoopilla.

5. Muita lähestymistapoja

Ruotsalainen *CerviSCAN*-projekti tähtää edullisen automaattisen seulonta-järjestelmän kehittämiseen erityisesti kehittyvien maiden käyttöön. Projektin lähtökohtana on niin sanottu MAC-strategia (malignancy associated changes), jossa sinänsä terveissä soluissa olevat pienet solumuutokset pyritään tunnistamaan sen sijaan että etsittäisiin varsinaisia syöpäsoluja. Strategia perustuu tekstuuripiirteisiin, ja vaatii tarkkoja kuvia, mikä on ratkaistu monifokustekniikalla. [Malm and Bengtsson, 2011]

Neuroverkkoihin pohjautuvista lähestymistavoista Papa-näytteiden luokitteluun mainittakoon *hybridi-MLP*-verkon käyttö [Ramli et al., 2004] sekä *LMAM*-verkkojen käyttö (Levenberg-Marquardt with Adaptive Momentum) [Ampazis et al., 2004]. Huang ja Chen ovat tutkineet tukivektorikoneiden (Support Vector Machine, SVM) käyttöä yhdistettynä geneettisiin algoritmeihin [Huang et al., 2007; Chen et al., 2009].

6. Yhteenveto

Automaation käyttö Papa-näytteiden seulonnassa on osoittautunut vaikeamaksi ongelmaksi kuin mitä 1950-luvulla osattiin kuvitella. Vaikeuksille on esitetty monenlaisia syitä. Alkuaikojen epäonnistuneiden projektien muistot sekä tietokoneiden ja näyttöjen vieraus laboratorioympäristössä – patologit ovat tottuneita katsomaan mikroskooppiin eivätkä näyttöön – ovat saattaneet hidastaa automaattisten seulontajärjestelmien käyttöönottoa.

Osa syistä on myös puhtaasti teknisiä, esimerkiksi kertaluokkaa suuremmat datamäärät kuin muilla kuvantamisen aloilla. Kuten luvussa 3 kerrottiin, tuottaa yhden Papa-näytteen digitointi kokonaisuudessaan noin 31 gigapikseliä kuvadataa. Tätä voidaan verrata esimerkiksi radiologiseen rintakehän tietokonetomografiakuvaan, jonka tyypillinen koko on $512 \times 512 \times 512$ eli noin 134 miljoonaa kuvaelementtiä. [Madabhushi, 2009]. Olemassa olevat järjestelmät yrittävät helpottaa tätä ongelmaa useimmiten moniresoluutiotekniikalla, kuten PAPNET-järjestelmä käyttämällä kolmea eritehoista objektiivia.

Tekniset valmiudet suurten datamäärien käsittelyyn alkavat kuitenkin olla olemassa, ja kliiniset tutkimukset osoittavat, että Papa-näytteiden seulonnan automatisoinnilla saavutetaan nykyisin jo vastaava tai parempi herkkyys ja tarkkuus kuin perinteisillä silmämääräisillä menetelmillä [Kotaniemi-Talonen,

2009; Sherman et al., 1998; Lisboa and Taktak, 2006; Nijhuis et al., 2006].

Bengtssonin [2014] mukaan tästä kliinisestä menestyksestä huolimatta seulontojen hinta on edelleen pysynyt korkeana. Tämä on seurausta siitä, että vaikka automaattiset esiseulontajärjestelmät ovat parantaneet seulontojen laatua, tuottavat ne edelleen suuren määrän virheellisesti positiivisia tuloksia, jotka on aina tarkastettava käsin sytologin toimesta. Erityisesti köyhempien maiden käyttöön olisikin tarve saada edullinen ja toimiva automaattinen seulontajärjestelmä, jolla seulontojen kustannuksia saataisiin pienennettyä.

Viiteluettelo

- [Aho et al., 2010] Tellervo Aho, Pekka Nieminen, Elina Heikkilä ja Piia Vuorela, Kohdunkaulan solu- ja kudosuutokset. Saatavilla:
http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=khp00061
(3.9.2010)
- [Ampazis et al., 2004] Nikolaos Ampazis, George Dounias and Jan Jantzen, Pap-smear classification using efficient second order neural network training algorithms. In: *Proc. of the Third Hellenic Conference on Methods and Applications of Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science* **3025** (2004), Springer, 230-245.
- [BD Diagnostics, 2014] <http://www.bd.com/tripath/>
- [Bengtsson, 2003] Ewert Bengtsson, Computerized cell image analysis: past, present, and future. In: *Proc. of the 13th Scandinavian Conference on Image Analysis, SCIA, Lecture Notes in Computer Science* **2749** (2003), Springer, 45-53.
- [Bengtsson and Malm, 2014] Ewert Bengtsson and Patrik Malm, Screening for Cervical Cancer Using Automated Analysis of PAP-Smears. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2014.
- [Boon and Kok, 1995] Mathilde E. Boon and L.P. Kok, Classification of cells in cervical smears. In: Alan F. Murray (ed.), *Applications of Neural Networks*, Kluwer Academic Publishers, 1995, 113-132.
- [Chen et al., 2009] Yung-Fu Chen, Yung-Fa Huang, Xiaoyi Jiang, Yuan-Nian Hsu and Hsuan-Hung Lin, Design of clinical support systems using integrated genetic algorithm and support vector machine. In: *Computer Analysis of Images and Patterns, Lecture Notes in Computer Science* **5702** (2009), Springer, 791-798.

- [Huang et al., 2007] Po-Chi Huang, Yung-Kuan Chan, Po-Chou Chan, Yung-Fu Chen, Rung-Ching Chen and Yu-Ruei Huang, Quantitative assessment of pap smear cells by PC-Based Cytopathologic Image Analysis System and Support Vector Machine. In: *Medical Biometrics, Lecture Notes in Computer Science* **4901** (2007), Springer, 192-199.
- [HUSLAB, 2014] <http://huslab.fi/ohjekirja/4045.html>
- [Kotaniemi-Talonen, 2009] Laura Kotaniemi-Talonen, Randomised evaluation of new technologies within the population-based cervical cancer screening programme in Finland: cross-sectional performance and validity. Helsinki University Press, Helsinki 2009. Available at: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-10-5278-1>.
- [Lee et al., 1998] Lee J, Nelson A, Wilbur DC, Stanley F. Patten and the development of an automated papanicolaou smear screening system. *Cancer* **81** (1998) 332-336.
- [Lisboa and Taktak, 2006] P.J.G. Lisboa and A.F.G. Taktak, The use of artificial neural networks in decision support in cancer: a systematic review. *Neural Networks* **19** (2006), 408–415.
- [Luck and Scott, 1993] Randall L Luck and Richard Scott, Morphological classification system and method. U.S. Patent No. 5,257,182, 1993.
- [Madabhushi, 2009] Anant Madabhushi, Digital pathology image analysis: opportunities and challenges. *Imaging in Medicine* **1**, 1, (Oct. 2009) 7-10.
- [Malm, 2013] Patrik Malm, Image Analysis in Support of Computer-Assisted Cervical Cancer Screening. *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* **1106**, 2013.
- [Malm and Bengtsson, 2011] Patrik Malm and Ewert Bengtsson, The CerviSCAN project: Project description and current progress. In: *Proceedings SSBA 2011*.
- [Mango, 1994] Laurie J. Mango, Computer-assisted cervical cancer screening using neural networks. *Cancer Letters* **77**, 2-3 (Mar. 1994), 155-62.
- [Meijering, 2012] Erik Meijering, Cell segmentation: 50 years down the road. *IEEE Signal Processing Magazine* **29**, 5 (Sept. 2012), 140-145.
- [Mellors and Silver, 1951] Robert C. Mellors and Reuben Silver, A microfluorometric scanner for the differential detection of cells: application to exfoliate cytology. *Science* **114** (1951), 356-360.
- [MSAC, 2003] Medical Service Advisory Committee, Computer-assisted image analysis for cervical screening. *MSAC reference 12c* (May 2003), Department of Health and Ageing, Commonwealth of Australia.

- [Nijhuis et al., 2006] Esther R. Nijhuis, Nathalie Reesink-Peters, G. Bea A. Wisman, Hans W. Nijman, Jelmer van Zanden, Haukeline Volders, Harry Hollema, Albert J.H. Suurmeijer, Ed Schuuring, Ate G.J. van der Zee, An overview of innovative techniques to improve cervical cancer screening. *Cellular Oncology* **28**, 5-6 (2006), 233-246.
- [Papanicolaou and Traut, 1943] Papanicolaou GN and Traut HF, Diagnosis of Uterine Cancer by the Vaginal Smear. Oxford University Press, New York, 1943.
- [Public Health Rep., 1957] Public Health Rep. **72**, 11 (Nov. 1957), 1038.
- [Ramli et al., 2004] Dzati Athiar Ramli, Ahmad Fauzan Kadmin, Mohd. Yusoff Mashor, Nor Ashidi and Mat Isa, Diagnosis of cervical cancer using hybrid multilayered perceptron (HMLP) network. In: *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, Lecture Notes in Computer Science* **3213** (2004), Springer, 591-598.
- [Rodenacker and Bengtsson, 2003] Karsten Rodenacker and Ewert Bengtsson, A feature set for cytometry on digitized microscopic images. *Analytical Cellular Pathology*, **25**, 1 (2003), 1-36.
- [Rutenberg, 1990] Mark R. Rutenberg, Neural network based automated cytological specimen classification system and method. U.S. Patent No. 4,965,725, 1990.
- [Sherman et al., 1998] Sherman ME, Schiffman M, Herrero R, Kelly D, Bratti C, Mango LJ, Alfaro M, Hutchinson ML, Mena F, Hildesheim A, Morales J, Greenberg MD, Balmaceda I, Lorincz AT, Performance of a semiautomated Papanicolaou smear screening system: results of a population-based study conducted in Guanacaste, Costa Rica. *Cancer* **84**, 5 (Oct 1998), 273-80.
- [Tiitinen, 2014] Aila Tiitinen, Papa-koe. Lääkärikirja Duodecim. Saatavilla: http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00161 (20.10.2014)

Tekoälyn toiminnan valinta videopeleissä

Juuso Kaitila

Tiivistelmä

Pelien grafiikoiden lähestyessä fotorealismia myös tekoälyn vaatimukset kasvavat. Tekoälyn ohjaamien toimijoiden täytyy sopia pelin maailmaan eli grafiikoiltaan fotorealistisessa pelissä tekoälyn pitäisi vastata oikeiden ihmisten käyttäytymistä. Eri peligenreillä tekoälyvaatimukset eroavat kuitenkin melko paljon toisistaan, sillä esimerkiksi räiskintä- ja roolipeleissä ei-pelaaja-hahmojen täytyy käyttäytyä ihmismäisesti, kun taas strategiapeleissä riittää, että tekoäly käyttää ihmismäisiä taktiikoita ja strategioita.

Tässä tutkielmassa kerrotaan muutamasta tekoälyn toiminnan valinnan toteutustavasta ja selitetään niiden toimintaperiaate. Lisäksi pohditaan niiden toteutuksen vaikeutta sekä sitä, kuinka monimutkaisia tekoälyn käytöksiä niillä pystyy toteuttamaan.

Avainsanat: tekoäly, videopelit, äärelliset automaatit, käytöspuut, automoitu suunnittelu.

1 Johdanto

Tekoälyn toiminnan valinnan voi toteuttaa peleissä hyvin monella tavalla. Suosituimpiin toteutustapoihin kuuluvat esimerkiksi *komentosarjat* (scripts) sekä *äärelliset automaatit* (finite-state machines). Pelien grafiikoiden lähestyessä fotorealismia myös tekoälyn vaatimukset kasvavat, mikä tarkoittaa yhä monimutkaisemman käyttäytymisen tarvetta. Tekoälyn ohjaamien toimijoiden täytyy sopia pelin maailmaan eli grafiikoiltaan fotorealistisessa pelissä tekoälyn pitäisi vastata oikeiden ihmisten käyttäytymistä. Eri peligenreillä tekoälyvaatimukset eroavat kuitenkin melko paljon toisistaan, sillä esimerkiksi räiskintä- ja roolipeleissä ei-pelaaja-hahmojen täytyy käyttäytyä ihmismäisesti, kun taas strategiapeleissä riittää, että tekoäly käyttää ihmismäisiä taktiikoita ja strategioita.

Tässä tutkielmassa kerrotaan muutamasta yleisesti käytetystä tekoälyn toteutustavasta ja selitetään niiden toimintaperiaate. Kuvatut toteutustavat ovat äärelliset

automaatit, *käytöspuut* (behavior trees) ja *automoitu suunnittelu* (automated planning). Niiden toimintaperiaatteet on kuvattu luvussa 2 ja niiden toteuttamista havainnollistetaan esimerkillä luvussa 3. Lisäksi pohditaan niiden toteutuksen vaikeutta sekä sitä, kuinka monimutkaisia tekoälyn käytöksiä niillä pystyy toteuttamaan.

2 Eri tekoälyn toteutustavat

Tässä luvussa kuvataan muutaman peleissä käytetyn toteutustavan toimintaperiaate sekä kerrotaan niiden toteuttamisesta peleissä. Tarkasteltavat toteutustavat ovat äärelliset automaatit ja niiden hierarkkinen versio, käytöspuut ja automoitu suunnittelu, joka käsittää STRIPS-suunnittelijaan pohjautuvan sekä hierarkkisia tehtäväverkkoja käyttävän suunnittelun.

2.1 Äärelliset automaatit

Äärellisiä automaatteja käytetään laajalti tietojenkäsittelyn eri osa-alueilla, mutta peleissä niiden pääasiallinen käyttökohde on tekoälyn toteutus. Äärellinen automaatti A on viisikko (Hopcroft, Motwani, & Ullman, 2003)

$$(1) \quad A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F),$$

jossa

- Q on äärellinen joukko tiloja
- Σ on äärellinen joukko syötemerkkejä, ts. aakkosto
- $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$ on siirtymäfunktio
- $q_0 \in Q$ on alkutila
- $F \subseteq Q$ on lopputilojen joukko.

Siirtymäfunktio δ on tilojen joukon Q ja syötemerkkien joukon Σ karteesisen tulon kuvaus tilojen joukkoon Q . Funktiota δ voidaan siis merkitä $\delta(q, a) = p$, jossa q on tila ($q \in Q$), a on syötemerkki ($a \in \Sigma$) ja p on sellainen tila, että tilojen q ja p välillä on siirtymä, jonka yhteydessä automaatti lukee merkin a (Hopcroft et al., 2003). Funktion $\delta(q, a) = p$ voi tulkita niin, että tilassa q oleva äärellinen automaatti A siirtyy tilaan p käsiteltyään syötemerkin a .

Suosittu tapa kuvata äärellisiä automaatteja on tilakaavioksi kutsuttu suunnattu graafi, jossa tiloja kuvataan ympyröinä tai ellipseinä ja tilojen välisiä siirtymiä kuvataan kaarilla tai nuolilla (Hopcroft et al., 2003). Automaatin alkutilaa kuvaa usein tyhjästä tuleva nuoli, jota usein vielä korostetaan paksummalla viivalla tai jotenkin muuten. Graafinen esitys sopii hyvin äärellisen automaatin suunnittelemiseen, sillä se auttaa hahmottamaan tarvittavat tilat ja siirtymät niiden välillä.

Sloan, Kelleher ja Mac Namee (2011) kuvaavat äärellisiä automaatteja pelien kannalta. Heidän mukaansa äärellisen automaatin tilat vastaavat toimintaa, jonka tekoälyn ohjaaman toimija tulisi tehdä kyseisessä tilassa, ja siirtymät tilojen välillä ovat tapahtumia pelimaailmassa. Lisäksi toimija voi olla vain yhdessä tilassa kerralla. Peleissä tilat kuvataan yleensä joukkona toimintoja, jotka päivitetään tilan ollessa aktiivisena, ja joukkona ehtoja, joita käytetään seuraavaksi aktivoitavien siirtymien määrittämiseen (Champandard, 2007a).

Champandardin (2007a) mukaan yleisimmät tavat toteuttaa äärellinen automaatti peleissä ovat kovakoodaus, tulkin käyttö ja äärellisen automaatin kääntäjän käyttö. Kovakoodaus sopii parhaiten pienikokoisille äärellisille automaateille. Kovakoodatun äärellisen automaatin voi toteuttaa käyttämällä switch-case -rakennetta tai *tilamallia* (state pattern). Tulkkia käyttävä tapa perustuu tilat ja siirtymät määrittelevän tiedoston lataamiseen. Myös kääntäjää käyttävä tapa perustuu tilat ja siirtymät määrittelevän tiedoston lataamiseen, mutta tulkista eroten se käännetään alhaisen tason konekielelle tai siitä luodaan C- tai C++-kielen koodia¹.

Äärellisissä automaateissa on, kuten muissakin toteutustavoissa, hyvät ja huonot puolensa. Äärellisten automaattien valttikortteja ovat hyvä suorituskyky, joustavuus ja suhteellisen nopea toteutus. Kuitenkin toteutettaessa monimutkaista tekoälyä automaattien tilojen määrä kasvaa nopeasti, mikä puolestaan johtaa tarvittavien siirtymien määrän eksponentiaaliseen kasvuun. Jokainen siirtymä tulee määritellä koodissa, mikä tarkoittaa sitä, että kehittäjän tulee ennakoida kaikki tarvittavat siirtymät jo suunnitteluvaiheessa (Sloan et al., 2011). Harel (1987) ratkaisi tämän ongelman hierarkkisuudella, joka on yleisin peleissä käytetty tapa ratkaista tämä *tilaräjähdykseksi* (state explosion) kutsuttu ongelma (Champandard, 2007b).

2.2 Hierarkkiset äärelliset automaattit

Hierarkkisen äärellisen automaatin eron tavalliseen äärelliseen automaattiin ei ole suuri. Sen hierarkkisuus tulee siitä, että äärellisen automaatin tila jalostuu omak-

¹C ja C++ ovat yleisimmät peleissä käytetyt ohjelmointikielet.

si äärelliseksi automaatikseen. Tällaista omaksi äärelliseksi automaatiksi jalostuvaa tilaa Harel (1987) kutsuu *ylitilaksi* (superstate). Ylitiilojen käyttö vähentää tarvittavien siirtymien määrää (Girault, Lee, & Lee, 1999), koska ylitilan sisältämät *alitilat* (substates) voivat jakaa siirtymät ulkoisen äärellisen automaatin tilojen välillä. Ylitilan ja tavallisen tilan välisiä siirtymiä Harel (1987) nimittää *yleistetyiksi siirtymiksi* (generalized transitions).

Hierarkkisen äärellisen automaatin graafisessa kuvauksessa ylitiilat kuvataan yleensä laatikoina, joiden sisällä on tiloja ja siirtymiä, jotka on puolestaan kuvattu tavallisen äärellisen automaatin tyyliä. Siirtymät tavallisten tilojen ja ylitiilojen välillä on kuvattu kaarella tai nuolella, joka johtaa joko ylitilan laatikkoon tai suoraan ylitilan alitilaan. Jos nuoli tai kaari johtaa ylitilan laatikkoon, lähtee laatikon reunasta uusi nuoli ylitilan alitilaan tai ylitilan sisällä on automaatin alkua osoittava nuoli. Graafisesti kuvattuna tila voi olla vain yhden ylitilan alitila kerrallaan, minkä Champandard (2007b) sanoo pätevän myös suurimpaan osaan hierarkkisten äärellisten automaattien toteutuksiin peleissä.

Vaikka hierarkkiset automaattit mahdollistavat siirtymien uudelleenkäytön, niiden heikkoutena kuitenkin on se, että siirtymien yhdistäminen ei ole aina yksinkertaista. Pelien yhteydessä kehittäjältä vaaditaan paljon ajatustyötä, kun logiikka täytyy luoda moniin eri konteksteihin (Champandard, 2007b). Hierarkkisista äärellisistä automaateista on olemassa variantteja, jotka mahdollistavat modulaarisuuden ja koko automaatin uudelleenkäytön (Hu, Zhang, & Mao, 2011).

2.3 Käytöspuut

Tekoälyä kuvaavat käytöspuut (vrt. järjestelmä- ja ohjelmistotuotannossa käytetyt järjestelmää kuvaavat käytöspuut) ovat hierarkkisia äärellisiä automaatteja muistuttava toteutustapa tekoälylle. Limin, Baumgartenin ja Coltonin (2010) mukaan käytöspuut tekevät monimutkaisen tekoälyn käytöksen suunnittelun ja toteuttamisen yksinkertaiseksi. Lisäksi ne skaalautuvat pelin koon kasvaessa ja ne ovat myös modulaarisia, mikä mahdollistaa uudelleenkäytön.

Ögrenin (2012) esittämän määritelmän mukaan käytöspuu on suunnattu puu, jossa on kaaria ja solmuja. Kuten muissakin puissa, lapsettomat solmut ovat lehtiä, ja ilman vanhempia oleva solmu on juuri. Ögren (2012) sekä Lim ja muut (2010) määrittelevät lehtisolmut kahdeksi tyyppiä: toiminnoiksi ja ehdoiksi. Muut solmut ovat Limin ja muiden mukaan *sekvenssejä* (sequences), *valitsijoita* (selectors) tai *muuntajia* (decorators). Ögrenin määritelmän mukaan muille solmuille on olemassa

vielä neljäskin tyyppi: *rinnakkaissolmu* (parallel). Unreal Engine 4 -pelimoottorin dokumentaation (Epic Games, 2014) mukaan käytöspuun juurisolmulla voi olla vain yksi lapsisolmu, joka ei voi olla muuntaja- tai rinnakkaissolmu.

Käytöspuun toiminta alkaa rastittamalla juurisolmu, jonka jälkeen *rastia* (tick) kuljetetaan puussa alaspäin solmujen tyyppien perusteella. Kun rasti saavuttaa leh-
tisolmun, suoritetaan siihen solmuun liittyvää laskentaa, joka palauttaa tiedon on-
nistumisesta, epäonnistumisesta tai suorituksessa olemisesta. Tätä tietoa sekä rastia
kuljetetaan puussa ylöspäin kohti juurisolmua solmujen tyyppien mukaan. (Ögren,
2012)

Solmutyypeistä **valitsijasolmua** käytetään löytämään ja valitsemaan ensimmäi-
nen onnistumisen tai suorituksessa olemisen palauttava lapsisolmu. Se käy lapsisol-
mut läpi tärkeysjärjestyksessä ja palauttaa lapsisolmun tilan tai tiedon epäonnistu-
misesta, mikäli kaikki lapset epäonnistuivat. (Ögren, 2012; Lim et al., 2010) Algo-
ritmissa 1 on kuvattu valitsijasolmun toiminta pseudokoodina.

Algoritmi 1 Valitsijasolmu (Ögren, 2012)

```

1: procedure VALITSIJA
2:   for  $i \leftarrow 1$  to lasten lukumäärä do
3:      $lapsenTila \leftarrow rastita(lapsi(i))$ 
4:     if  $lapsenTila \neq epäonnistui$  then return  $lapsenTila$ 
   return epäonnistui

```

Sekvenssisolmua käytetään suorittamaan lapsisolmuja vuoronperään järjestykses-
sä. Se suorittaa lapsisolmuja niin kauan kuin niitä on jäljellä, ja ne palauttavat tie-
don onnistumisesta. Sekvenssisolmu palauttaa tiedon onnistumisesta, jos kaikki sen
lapsisolmut on suoritettu onnistuneesti. (Ögren, 2012; Lim et al., 2010) Algoritmissa
2 on kuvattu sekvenssisolmun toiminta pseudokoodina.

Algoritmi 2 Sekvenssisolmu (Ögren, 2012)

```

1: procedure SEKVENSSI
2:   for  $i \leftarrow 1$  to lasten lukumäärä do
3:      $lapsenTila \leftarrow rastita(lapsi(i))$ 
4:     if  $lapsenTila \neq onnistui$  then return  $lapsenTila$ 
   return onnistui

```

Rinnakkaissolmua käytetään, jos halutaan suorittaa lapsisolmut rinnakkain. Sil-
le on määritetty sellainen onnistuneiden lapsisolmujen lukumäärä (N), jonka tulee
täyttyä, jotta se itse palauttaa onnistumisen. Osa lapsisolmuista voi siis epäonnistua

ilman, että rinnakkaissolmu epäonnistuisi. (Ögren, 2012) Algoritmissa 3 on kuvattu rinnakkaissolmun toiminta pseudokoodina.

Algoritmi 3 Rinnakkaissolmu (Ögren, 2012)

```
1: procedure RINNAKKAIS
2:   for  $i \leftarrow 1$  to lasten lukumäärä do
3:      $lapsenTila(i) \leftarrow rastita(lapsi(i))$ 
4:   if  $kaikkiSuorituksessa(lapsenTila)$  then return suorituksessa
5:   else if  $yliNkplOnnistui(lapsenTila)$  then return onnistui
6:   else return epäonnistui
```

Jos halutaan muuttaa lapsisolmun toimintaa ehtolauseella, käytetään **muuntajasolmua**. Se sisältää vain yhden lapsisolmun, jonka palauttamaa tilaa ehtolause voi muuttaa. Muuntajasolmun asettama ehtolause voi myös estää lapsisolmun suorituksen esimerkiksi varmistamalla, että lapsisolmu suoritetaan vain kerran. (Ögren, 2012; Lim et al., 2010) Algoritmissa 4 on kuvattu valitsijasolmun toiminta pseudokoodina.

Algoritmi 4 Muuntajasolmu (Ögren, 2012)

```
1: procedure MUUNTAJA
2:   if jokin ehto then
3:      $lapsenTila \leftarrow rastita(lapsi)$ 
4:    $tila \leftarrow jokinFunktio()$ 
5:   return tila
```

Lehtisolmuista **toimintosolmua** käytetään, jos halutaan suorittaa toiminto, joka saa tekoälyn ohjaaman toimijan tekemään halutun asian. Se palauttaa toiminnon suorituksen tilan, joka voi olla onnistuminen, epäonnistuminen tai suorituksessa oleminen. **Ehtosolmua** puolestaan käytetään selvittämään jonkin ehdon täyttymistä. Peleissä nämä ehdot ovat maailman tai toimijan tilaan liittyviä. Ehtosolmu palauttaa vain onnistumisen tai epäonnistumisen. (Ögren, 2012; Lim et al., 2010)

2.4 Automoitu suunnittelu

Automoitu suunnittelu tarkoittaa tekoälyn suunnittelun muuttamista osittain automatisoiduksi ja sen toteutuksen voi jakaa STRIPSiin (Stanford Research Institute Problem Solver) (Fikes & Nilsson, 1972) ja *hierarkkisiin tehtäväverkkoihin* (hierarchical task network) pohjautuviin suunnittelijoihin. Sen suurimpia etuja ovat

tekoälyyn liittyvän koodin yksinkertaistuminen ja väheneminen (vrt. äärelliset automaattit) sekä tekoälyn ohjaamien toimijoiden käyttäytymisen monimutkaistuminen (Kelly, Botea, & Koenig, 2008; Orkin, 2003).

2.4.1 STRIPSiin pohjautuva suunnittelu

STRIPSiin pohjautuva automaattinen suunnittelu käyttää tavoitteita tekoälyn toimijoiden ohjaamiseen, minkä takia sitä kutsutaan myös *tavoitepohjaiseksi toimintasuunnitteluksi* (goal-oriented action planning). Orkin (2003; 2006) on kuvannut sen käyttöä ja soveltuvuutta pelien kannalta. Hän on lisäksi käyttänyt sitä kaupallisessa F.E.A.R.-pelissä hyvällä menestyksellä.

Sen toiminta perustuu tekoälylle asetettuihin tavoitteisiin, jotka määritellään maailman tiloiksi. Nämä tilat eivät kuitenkaan vastaa äärellisten automaattien tiloja. STRIPS-pohjainen suunnittelija muodostaa näiden tavoitetilojen pohjalta tekoälylle toimintoketjun, jonka suorittamalla tekoäly pääsee lähtötilasta tavoitetilaan. Jokaisella toiminnolla on arvo, joka määrittää toiminnon kustannuksen. Lisäksi toiminnolle on määritelty vaikutus sekä mahdollinen ennakkoehto. Suunnittelija käyttää toimintoketjun muodostamiseen A*-algoritmia (Hart, Nilsson, & Raphael, 1968). A* on graafin lyhimmän polun etsintään kehitetty algoritmi, joka käyttää hyväksi tietoa ongelma-alueesta (Hart et al., 1968). Orkinin (2003; 2006) mukaan STRIPS-pohjaisen suunnittelun yhteydessä A* käyttää toiminnon kustannusarvoa heuristiikkana lyhimmän polun, ja siten myös tilanteeseen parhaiten sopivan toimintoketjun, muodostamiseen. Toiminnot ovat A*:n kannalta kaaria solmujen välillä ja maailman tilat ovat solmuja. A* muodostaa polun takaperin eli tavoitetilasta alkutilaan.

Polun muodostamista takaperin Orkin (2003) perusteli sillä, että etuperin muodostuksessa jokin toiminto voi epäonnistua, jos sen ennakkoehto ei täyty, mikä johtaisi perusteelliseen hakuun oikeiden toimintojen löytämiseksi, jotta ennakkoehto täyttyisi. Taaksepäin muodostuksessa A*-algoritmi valitsee ensimmäiseksi pienimmän kustannusarvon omaavan ja tavoitteen täyttävän toiminnon ja sen jälkeen tarkistaa, onko toiminnon ennakkoehto täytetty ja jos ei ole, valitsee seuraavaksi toiminnon, joka täyttää sen.

Voidakseen läpikäydä toimintojen avaruutta, suunnittelijan täytyy Orkinin (2003) mukaan kuvata maailmantila siten, että sen on helppo soveltaa toimintojen esiehtoja ja vaikutuksia sekä tunnistaa, milloin se on saavuttanut tavoitetilan. Orkinin ehdotus tällaisen maailmantilan kuvauksen toteuttamiseksi on lista maailman omi-

naisuuksia kuvaavia rakenteita, jotka sisältävät attribuuttiavaimen, arvon sekä viittauksen kohteeseen.

F.E.A.R.-pelissä käytetty tavoitepohjaisen toimintasuunnittelun toteutus sisälsi suunnittelijan lisäksi myös äärellisen automaatin, jossa oli vain kolme tilaa. Nämä tilat vastasivat tekoälyn toimijan liikkumista pelin maailmassa sekä toimijan animointia. Nämä kolme tilaa olivat riittäviä, sillä tekoäly vain liikkuu pelimaailmassa ja toistaa animointeja, kun unohtaa kaikki muut toteutusyksityiskohdat. (Orkin, 2006)

Orkin (2006) sanoo tavoitepohjaisella toimintasuunnittelulla olevan kolme etua. Tavoitteiden ja toimintojen erottaminen on näistä yksi, ja se tarkoittaa sitä, että pelin hahmoille voi antaa omat toiminnot, joilla saavutetaan samat tavoitteet eri tavoin. Tämä mahdollistaa toimintojen sekä tavoitteiden uudelleenkäytön, mikä tekee esimerkiksi uusien vihollistyyppien lisäämisen peliin nopeammaksi. Tavoitepohjaisen toimintasuunnittelun toinen etu on monimutkaisten käytösten luonti kerrostamalla yksinkertaisia käytöksiä. Tämän voi tehdä vain lisäämällä pelin hahmoille tavoitteita ja toimintoja. Suunnittelija hoitaa siirtymät eikä kehittäjien tarvitse miettiä tai toteuttaa niitä. Kehittäjien tarvitsee vain määrittää toiminnoille tarvittavat esiehdot. Kolmas tavoitepohjaisen toimintasuunnittelun etu on tekoälyn dynaaminen ongelmanratkaisu, joka tulee suunnittelijan kyvystä suunnitella toimintoketju uudelleen, jos edellinen suunnitelma epäonnistui. Uudelleensuunnittelu hyödyntää työmuistiin tehtyjä merkintöjä edelliset suunnitelmat estäneistä syistä tai esteistä, joiden pohjalta suunnittelija pystyy valitsemaan vaihtoehtoisen toiminnon, joka saavuttaa saman tavoitteen.

Tavoitepohjaisen toimintasuunnittelun edut ovat paperilla hyviä, mutta niillä on hintansa. STRIPS-pohjainen suunnittelija käyttää muihin tekoälyn toteutustapoihin verrattuna paljon resursseja, minkä esimerkiksi Sloan ja muut (2011) ovat todenneet. Huono suorituskkyky onkin yksi tavoitepohjaisen toimintasuunnittelun heikkouksista. Muihin heikkouksiin kuuluu esimerkiksi vain suunnittelijan tarvitsemien, ja siten muun pelin kannalta turhien, maailmantilaa kuvaavien muuttujien lisääminen peliin (Champandard, 2011).

2.4.2 Hierarkkisiin tehtäväverkkoihin pohjautuva suunnittelu

Hierarkkisiin tehtäväverkkoihin pohjautuva suunnittelu käyttää STRIPSiin pohjautuvan suunnittelun kanssa samankaltaisia tiloja ja toimintoja (Erol, Hendler, & Nau, 1994a). Siinä maailman tila esitetään joukkona *perusosasia* (atoms) ja toiminnot

vastaavat tilojen välisiä siirtymiä (Erol et al., 1994a; Nau et al., 2003). Suurimmat erot hierarkkisiin tehtäväverkkoihin pohjautuvan ja STRIPSiin pohjautuvan suunnittelun välillä ovat siinä, mitä varten ja miten suunnitellaan (Erol, Hendler, & Nau, 1994b; Nau et al., 2003). Erolin, Hendlerin ja Naun (1994b) mukaan hierarkkisia tehtäväverkkoja käyttävä suunnittelija etsii suunnitelmia, jotka toteuttavat tehtäväverkkoja. Suunnitelman muodostus tapahtuu *tehtävien hajottamista* (task decomposition) ja konfliktien selvitystä käyttäen.

Naun ja muiden (2003) mukaan hierarkkisia tehtäväverkkoja käyttävän suunnittelijan muodostama suunnitelma on, kuten myös STRIPSiin pohjautuvassa suunnittelussa, toimintoketju, jonka suoritus toteuttaa halutun tehtävän. Erol ja muut (1994a) kuvaavat suunnittelijan ottavan syötteenä:

- Ratkaistavaa ongelmaa esittävän tehtäväverkon d , joka on joukko tehtäviä. Tehtävät puolestaan esittävät asioita, jotka tulee tehdä. Tehtävät jakautuvat primitiivisiin ja ei-primitiivisiin tehtäviin. Primitiiviset tehtävät voidaan suorittaa heti, mutta ei-primitiiviset tehtävien suorituksen suunnittelija joutuu selvittämään. Tehtävien lisäksi tehtäväverkot sisältävät rajoitteita tehtäville.
- Jokaisen primitiivisen tehtävän eli toiminnon vaikutuksen kertovan operaattorien joukon Op .
- Ei-primitiivisten tehtävien suorituksen kertovien metodien joukon Me . Metodit ovat pareja $m = (t, d)$, jossa t on tehtävä ja d on tehtäväverkko. Metodin voi tulkita siten, että yksi tapa saavuttaa t on suorittaa tehtäväverkossa d kuvatut tehtävät.

Suunnittelu tapahtuu toistamalla seuraavia askelia syötteenä saatuun tehtäväverkkoon d kunnes ei-primitiivisiä tehtäviä ei ole enää jäljellä:

- Etsi sellainen ei-primitiivinen tehtävä $u \in d$ ja sellainen metodi $m = (t, d') \in Me$, että t ja u yhdistyvät.
- Muokkaa tehtäväverkkoa d korvaamalla tehtävä u tehtäväverkon d' tehtävillä ja liittämällä d' :n sisältämät rajoitteet tehtäväverkkoon d .

Kun ei-primitiivisiä tehtäviä ei ole enää jäljellä tehtäväverkossa d , etsitään tehtäväverkon d täysin järjestetty *kehysilmentymä* (ground instantiation) σ , joka täyttää kaikki rajoitteet. Jos σ löydetään, se on onnistunut suunnitelma alkuperäiselle ongelmalle. (Erol et al., 1994a)

Erolin ja muiden (1994a) mukaan tehtäväverkoissa on kolmentyyppisiä tehtäviä: *tavoitetehtäviä*, *yhdistetehtäviä* (compound tasks) ja *primitiivisiä tehtäviä*. Tavoitetehtävät vastaavat osittain STRIPS-pohjaisen suunnittelun tehtäviä ja ne ovat asioita, jotka halutaan tehdä todeksi maailmassa. Primitiiviset tehtävät ovat toimintoja, jotka suorittamalla myös tehtävä tulee suoritetuksi. Yhdistetehtäviin liittyy useita primitiivisiä tehtäviä ja tavoitetehtäviä, mikä mahdollistaa sellaisten tehtävien esittämisen, joita ei pystytä esittämään primitiivisenä tehtävänä tai tavoitetehtävänä.

Naun ja muiden (2003) mukaan suunnittelualueen kuvaus sisältää operaattoreiden joukon ja metodien joukon. Jokainen metodi on ohje toiminnon jakamiseksi alitehtäviksi. Suunnitteluongelma puolestaan sisältää klassisen suunnittelun kaltaisen alkutilan, mutta tavoitteiden sijaan ongelman määrittely sisältää osittain järjestetyn joukon suoritettavia tehtäviä.

Suunnittelijan tekemä suunnittelu tapahtuu Naun ja muiden (2003) mukaan jakamalla metodeja rekursiivisesti yhä pienempiin alitehtäviin kunnes saavutetaan primitiivisiä tehtäviä, jotka voidaan suorittaa heti operaattoreita käyttämällä. Suunnittelija etsii jokaiselle ei-primitiiviselle tehtävälle sopivan metodin, jonka ilmentymän se luo ja jakaa siihen liittyvän tehtävän alitehtäviksi. Jos suunnitelmasta tulee mahdoton, suunnittelija palaa taaksepäin kokeilemaan muita metodeita.

Naun ja muiden (2003) kuvaus hierarkkisia tehtäväverkkoja käyttävästä suunnittelusta eroaa jonkin verran Erolin ja muiden (1994a) kuvauksesta. Lisäksi se on käytännönläheisempi liittymällä SHOP2-nimiseen (Nau et al., 2003) suunnittelijaan, mikä on myös pelien kannalta oleellista. Peleissä käytetyt hierarkkisia tehtäväverkkoja käyttävät suunnittelijat pohjautuvat pääasiassa SHOP- (Nau, Cao, Lotem, & Munoz-Avila, 1999) ja SHOP2-nimisiin suunnittelijoihin (Champandard, 2013). SHOP on lyhenne sanoista Simple Hierarchical Ordered Planner.

Hierarkkisia tehtäväverkkoja käyttävä suunnittelu tarjoaa STRIPS-pohjaiseen suunnitteluun verrattuna paremman suorituskyvyn sekä tekee suunnittelijan hallinnasta helpompaa jakamalla tehtäviä ylhäältä alas (Champandard, 2011). Sen tehokas toteuttaminen ja pelin suunnitelman mukaisten suunnittelualueiden luominen on kuitenkin melko haastavaa.

3 Esimerkit toteutustapojen toteutuksesta

Tässä luvussa havainnollistetaan esimerkin avulla luvussa 2 kuvattujen toteutustapojen toimintaa ja toteutusta. Esimerkkinä toimii kuvitteellinen simulaatio pelistä,

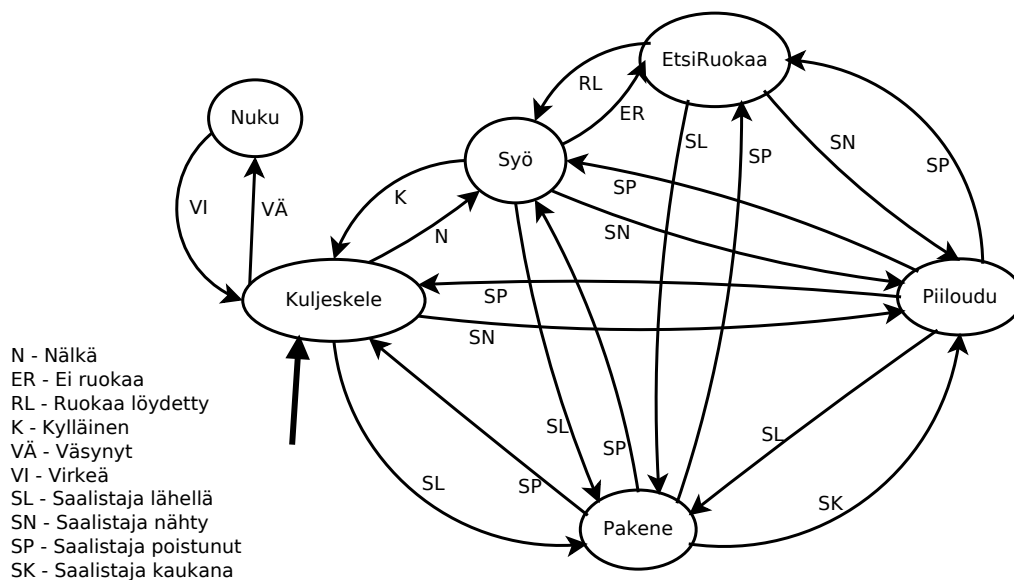
jossa on useita jäniksiä sekä saalistajia, jotka ovat jänisten vihollisia. Toteutustapoja käytetään kuvaamaan yhden jäniksen toimintaa pelin maailmassa.

Esimerkin jänis on yksinkertaistettu mallinnus oikeasta jäniksestä. Se syö, etsii ruokaa, nukkuu, pakenee ja piiloutuu saalistajilta sekä kuljeskelee ympäri maailmaa. Tämä siis tarkoittaa, että jäniksen tekoäly suorittaa kyseisiä toimintoja jäniksen ja maailman tilan mukaan. Jäniksen tilaa määrittävät kylläisyys ja väsyneisyys. Maailman tilan perusteella jänis havaitsee saalistajia.

Esimerkin yhteydessä oletetaan, että on olemassa jäniksen toteuttava luokka, jossa on tarvittavat muuttujat tiloja varten sekä tarvittavat metodit, kuten olion tilat päivittävä metodi. Kylläisyyttä ja väsyneisyyttä määrittävät muuttujat voisivat esimerkiksi olla kokonaislukuja, joiden arvoja vähennetään jokaisella kerralla kun oliota päivitetään.

Jäniksen tilat priorisoidaan siten, että saalistajilta pyritään selviämään ensisijaisesti. Tätä seuraa nälästä eroon pääseminen, jonka jälkeen tärkeysjärjestyksessä seuraavana on väsymyksestä eroon pääseminen. Vähiten tärkeimmäksi tilaksi jää kuljeskelu.

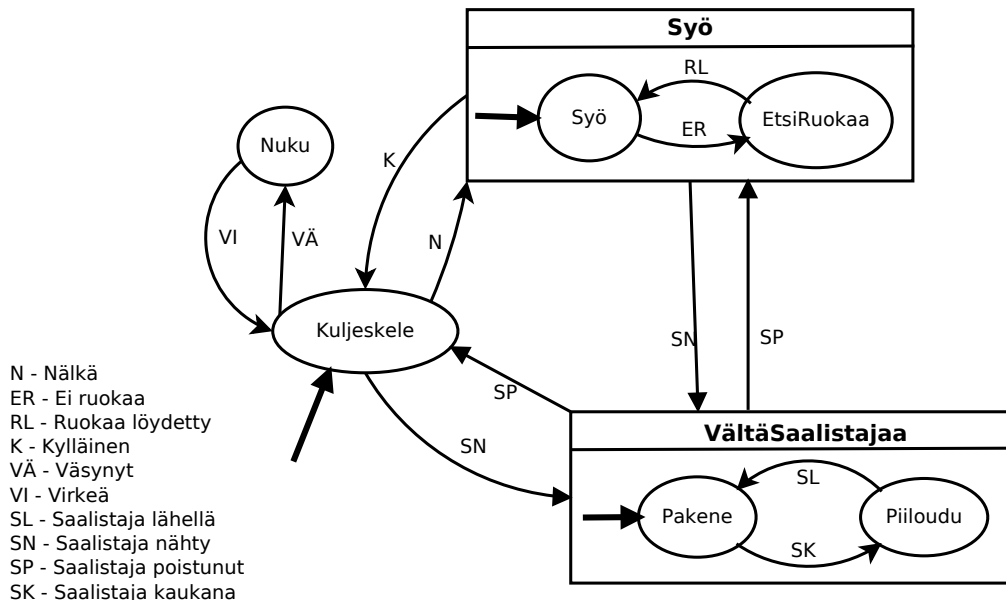
3.1 Äärellinen automaatti



Kuva 1. Jänisesimerkki kuvattuna äärellisenä automaattina

Kuvassa 1 on kuvattu tilakaaviona jäniksen toiminta tavallisena äärellisenä automaattina. Jo kuusi tilaa on kasvattanut siirtymien määrän melko suureksi ja auto-

maatin graafinen esitys on jo hieman sekava. Tilojen väliset siirtymät on nimetty lyhenteillä, joiden seloste löytyy kuvan vasemmasta alalaidasta.



Kuva 2. Jänisesimerkki kuvattuna hierarkkisenä äärellisenä automaattina

Kuvassa 2 on puolestaan kuvattu sama äärellinen automaatti hierarkkiseksi muutettuna. Siinä äärellisen automaatin syömiseen ja saalistajilta välttymiseen liittyvät tilat on jalostettu ylitiloiksi, mikä on vähentänyt siirtymien määrää huomattavasti. Siirtymien vähentyminen tekee tilakaaviosta huomattavasti selkeämmän ja paremmin hahmotettavan verrattuna kuvaan 1.

Algoritmi 5 kuvaa pseudokoodina jänisesimerkin toteutuksen äärellisenä automaattina. Siinä äärellinen automaatti on toteutettu kovakoodattuna käyttäen switch-lauseetta, jota varten tilat on määritelty vakioksi. Tilojen väliset siirtymät tehdään if-else-lauseilla käyttämällä ehtoina jäniksen ja maailman tilaa kuvaavia muuttujia. Aina kun jänistoimijan sekä maailman tilaa päivitetään, suoritetaan algoritmista kuvattu proseduuri, joka määrittää mitä jäniksen tulee seuraavaksi tehdä.

Algoritmi 5 Äärellinen automaatti

```

1: procedure FSM
2:   switch tila do                                     ▷ Selvitetään nykyinen tila
3:     case KULJESKELE
4:       if saalistajaLähellä then
5:         tila ← PAKENE

```

```

6:      edellinenTila ← KULJESKELE
7:      else if saalistajaNähty then
8:          tila ← PIILOUDU
9:          edellinenTila ← KULJESKELE
10:     else if väsymys  $\leq$  20 then
11:         tila ← NUKU
12:     else if kylläisyys  $\leq$  30 then
13:         tila ← SYÖ
14:     else
15:         kuljeskele()
16:     break
17: case NUKU
18:     if väsymys  $\geq$  80 then
19:         tila ← KULJESKELE
20:     else
21:         nuku()
22:     break
23: case SYÖ
24:     if saalistajaLähellä then
25:         tila ← PAKENE
26:         edellinenTila ← SYÖ
27:     else if saalistajaNähty then
28:         tila ← PIILOUDU
29:         edellinenTila ← SYÖ
30:     else if eiRuokaa then
31:         tila ← ETSI_RUOKAA
32:     else if kylläisyys  $\geq$  80 then
33:         tila ← KULJESKELE
34:     else
35:         syö()
36:     break
37: case PAKENE
38:     if saalistajaKaukana then
39:         tila ← PIILOUDU

```

```

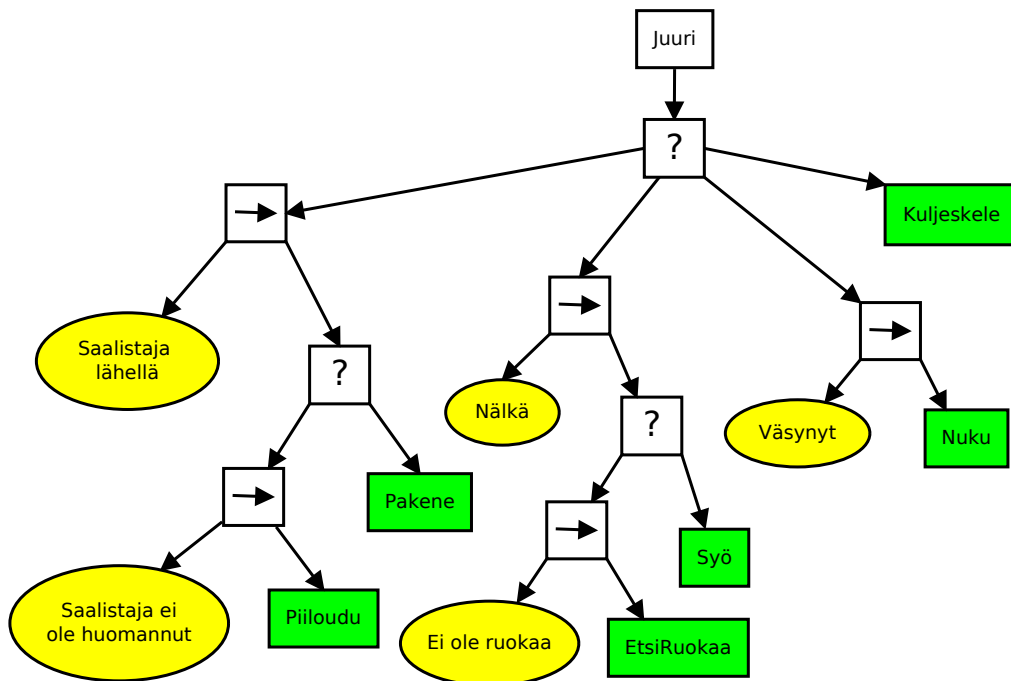
40:         else if saalistajaPoistunut then
41:             tila  $\leftarrow$  edellinenTila
42:         else
43:             pakene()
44:         break
45:     case PIILOUDU
46:         if saalistajaLähellä then
47:             tila  $\leftarrow$  PAKENE
48:         else if saalistajaPoistunut then
49:             tila  $\leftarrow$  edellinenTila
50:         else
51:             piiloudu()
52:         break
53:     case ETSI_RUOKAA
54:         if saalistajaLähellä then
55:             tila  $\leftarrow$  PAKENE
56:             edellinenTila  $\leftarrow$  ETSI_RUOKAA
57:         else if saalistajaNähty then
58:             tila  $\leftarrow$  PIILOUDU
59:             edellinenTila  $\leftarrow$  ETSI_RUOKAA
60:         else if ruokaaLöydetty then
61:             tila  $\leftarrow$  SYÖ
62:         else
63:             etsiRuokaa()
64:         break

```

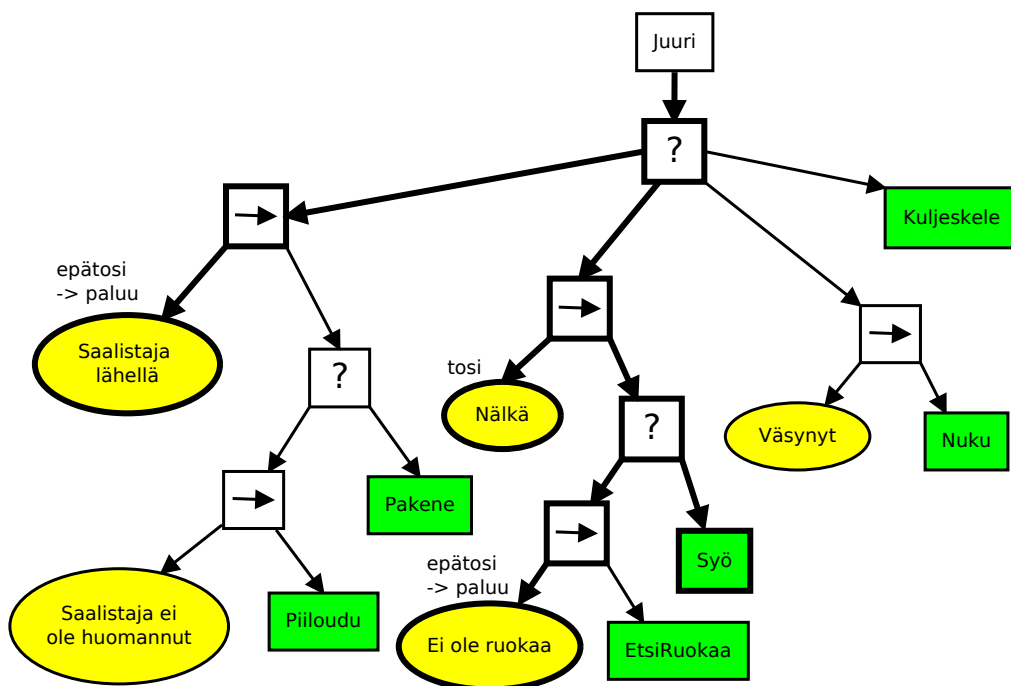
3.2 Käytöspuu

Kuvassa 3 on kuvattu jänisesimerkki käytöspuuna. Kyseessä on jäniksen koko toiminnan kuvaus. Siinä kysymysmerkillä kuvatut solmut ovat valitsijasolmuja ja oikealle osoittavalla nuolella kuvatut solmut ovat sekvenssisolmuja. Keltaisella taustalla kuvatut lehtisolmut ovat ehtosolmuja ja vihreällä taustalla kuvatut lehtisolmut ovat toimintosolmuja. Valitsijasolmuille asetettu läpikäyntijärjestys on vasemmalta oikealle. Tällöin juuresta lähtiessä *Kuljeskele*-toimintoon päästään vain, kun muut haarat eivät toteudu.

Kuvassa 4 on kuvattu suoritettavan toiminnon etsinnän eteneminen käytöspuussa.



Kuva 3. Jänisesimerkki kuvattuna käytöspuuna

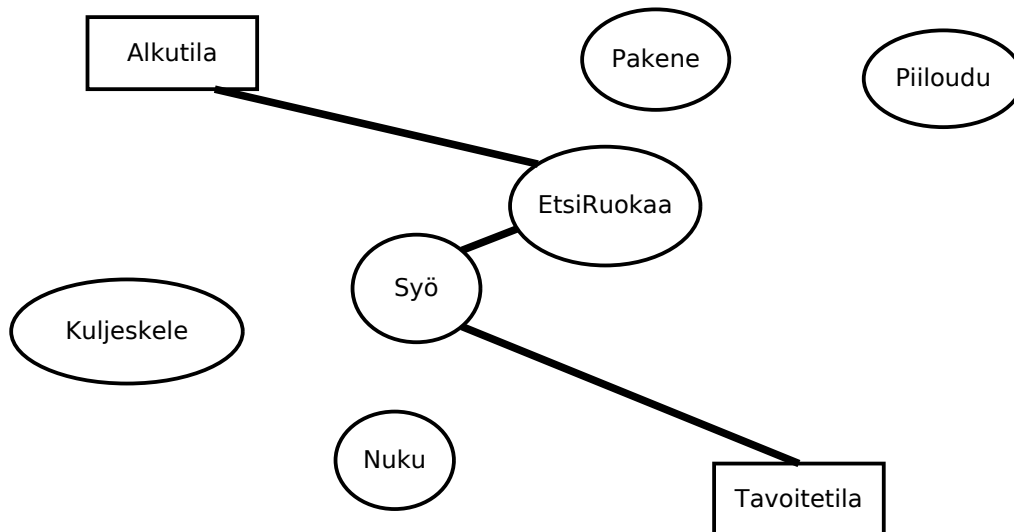


Kuva 4. Syö-toiminnon haku kuvan 3 käytöspuusta

Siinä paksut nuolet ja solmujen reunukset kuvaavat etenemistä solmusta toiseen päätyen lopulta Syö-toimintoon.

3.3 STRIPSiin pohjautuva suunnittelu

Tässä alikohdassa kuvataan jäniksen Syö-toiminto STRIPSiin pohjautuvalla suunnittelulla toteutettuna Orkinin (2003; 2006) kuvauksiin pohjautuen.

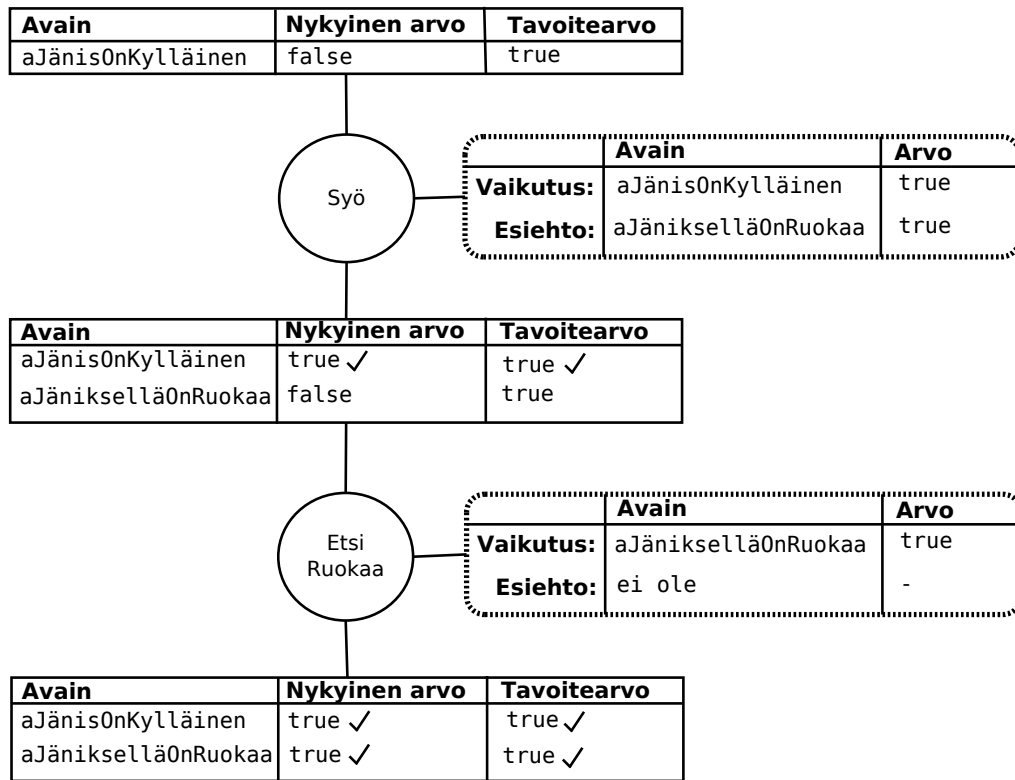


Kuva 5. Esimerkin jäniksen nälän poistamiseen luotu suunnitelma, jossa jänis joutuu etsimään ruokaa ennen kuin se voi syödä.

Kuvassa 5 on esitetty graafisesti yksi mahdollinen STRIPSiin pohjautuvan suunnittelijan laatima suunnitelma esimerkin jänikselle. Siinä tavoitetilana on kylläinen jänis ja alkutilana nälkäinen jänis. Jotta jäniksestä tulisi kylläinen, sen on syötävä, jolloin ensimmäiseksi toiminnoksi valitaan syöminen. Jänis joutuu kuitenkin etsimään ruokaa, koska se ei ole ruuan lähellä. Jänis pääseekin jo alkutilaan Etsi Ruokaa -toiminnosta, jolloin suunnittelija on muodostanut tavoitetilaan vievän suunnitelman. Jos suunnitelman muodostus tehtäisiin alkutilasta aloittaen, Syö-toiminto, ja siten myös koko suunnitelma, olisi epäonnistunut, koska jäniksellä ei olisi ollut ruokaa.

Suunnittelija etsii kyseisen suunnitelman kuvan 6 kuvaamalla tavalla. Siinä täytettävä ehto olisi jäniksen kylläisyyttä määrittävä totuusarvo, jonka pitäisi muuttua todeksi. Suunnittelija löytää Syö-toiminnon, joka muuttaa kyseisen totuusarvon todeksi, mutta jotta Syö-toiminto voidaan suorittaa, sen esiehdon tulee täytyä. Esiehto ei täyty, koska jäniksellä ei ole ruokaa, jolloin suunnittelija joutuu etsimään toiminnon, joka muuttaa esiehtoa määrittävän totuusarvon todeksi. Sen tekee Etsi Ruokaa -toiminto, jonka suunnittelija seuraavaksi löytää. Etsi Ruokaa -toiminnolla ei ole esiehtoa, jolloin suunnittelija on löytänyt sellaisen toimintoketjun, joka tekee

jäniksen kylläiseksi. Algoritmissa 6 on kuvattu Syö-toiminnon rakentaja pseudokoodina. Siinä toiminnon esiehdot ja vaikutukset on määritelty avain-arvo-pareja sisältävään taulukkoon tai vastaavaan tietorakenteeseen.



Kuva 6. Suunnittelijan suorittama haku kuvan 5 kuvaaman suunnitelman löytämiseksi.

Algoritmi 6 Kuvassa 6 esiintyvän Syö-toiminnon rakentaja

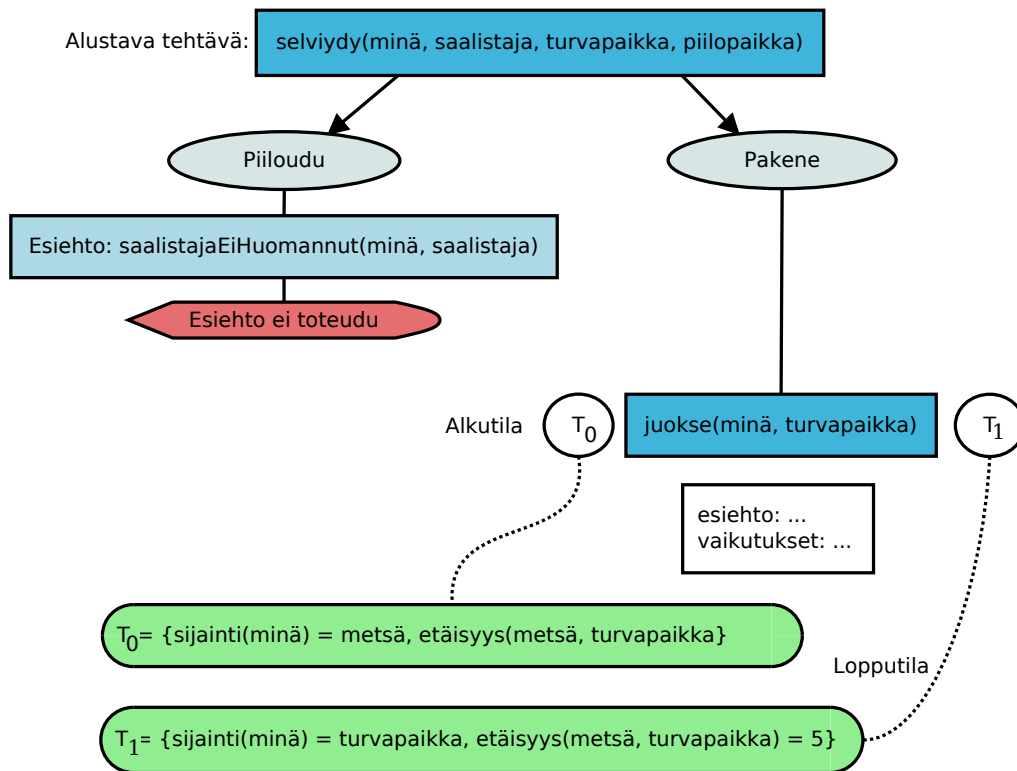
```

1: function SYÖ
2:   esiehtojenLkm ← 1
3:   esiehdot[0].avain ← aJänikselläOnRuokaa
4:   esiehdot[0].arvo ← true
5:
6:   vaikutustenLkm ← 1
7:   vaikutukset[0].avain ← aJänisOnKylläinen
8:   vaikutukset[0].arvo ← true

```

3.4 Hierarkkisia tehtäväverkkoja käyttävä suunnittelu

Tässä alikohdassa kuvataan jäniksen selviytyminen saalistajalta hierarkkisia tehtäväverkkoja käyttäen. Selviytymistehtävä kuvataan graafisesti ja lisäksi siihen liittyvä ongelma-alue kuvataan pseudokoodilla. Osa ongelma-alueesta muutetaan myös SHOP-suunnittelijan ottamaksi syötteenä.



Kuva 7. Esimerkin jäniksen selviytymisen suunnitteluongelma, johon on kuvattu suunnitelma, joka saa jäniksen pakenemaan saalistajalta.

Kuvassa 7 on kuvattu graafisesti yksi esimerkin jänikseen liittyvistä suunnitteluongelmista. Siinä tehtävänä on selviytyä, mikä voi tapahtua joko piiloutumalla tai pakenemalla saalistajalta. Nämä toiminnot on kuvattu yhdistetehtävinä. Kuvassa esitetyssä tilanteessa saalistaja on huomannut jäniksen eikä se voi enää piiloutua, jolloin piiloutumisen vaatima esiehto ei toteudu. Jänis joutuu siis pakenemaan suorittamalla *juokse*-operaattorin, joka saa jäniksen siirtymään paikasta toiseen juosten.

Algoritmissa 7 on kuvattu kuvaan 7 liittyvä suunnittelualue pseudokoodina käyttäen mallina Naun ja muiden (2005) pseudokoodiesitystä. Siinä on esitetty suunnittelualueen metodit ja operaattorit. Metodit on kuvattu listaamalla tehtävä, johon metodi liittyy, metodin mahdolliset esiehdot sekä metodin alitehtävät. Operaatto-

reista on puolestaan kuvattu listaamalla operaattorin mahdolliset esiehdot sekä sen vaikutukset. Osa tästä suunnittelualueesta on kuvattu SHOP-suunnittelijan ottamana syötteenä algoritmissa 8.

Algoritmi 7 Kuvaan 7 liittyvä suunnittelualue

```

1: method PIILAUDU
2:   tehtävä: selviydy( $a, b, x, y$ )
3:   esiehto: saalistajaEiHuomannut( $a, b$ )
4:   alitehtävät: siirryPaikkaan( $a, x$ ), menePiiloon( $a, x$ )
5:
6: method PAKENE
7:   tehtävä: selviydy( $a, b, x, y$ )
8:   alitehtävät: juokse( $a, x$ )
9:
10: operator juokse( $a, x$ )
11:   vaikutukset: sijainti( $a$ )  $\leftarrow x$ 
12:
13: operator siirryPaikkaan( $a, x$ )
14:   vaikutukset: sijainti( $a$ )  $\leftarrow x$ 
15:
16: operator menePiiloon( $a, x$ )
17:   esiehto: sijainti( $a$ ) =  $x$ 
18:   vaikutukset: näkyvyys( $a$ )  $\leftarrow$  piilossa

```

Algoritmi 8 Hieman yksinkertaistettu esimerkki SHOP-suunnittelijan syötteestä

```

1: (:method (pakene ?saalistaja)
2:   ((paikassa ?x))                                ▷ esiehto
3:   ((juokse ?x ?y)))                                ▷ alitehtävä
4:
5: (:operator (juokse ?x ?y)
6:   ((paikassa ?x))                                ▷ poistolista
7:   ((paikassa ?y)))                                ▷ lisäyslista

```

4 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa esitelty tekoälyn toiminnan valinnan toteutustavat ovat vain pieni osa mahdollisista toteutustavoista. Tekoälyyn liittyvien algoritmien ja toteutustapojen kehittyessä jatkuvasti monet aikaisemmin paljon käytetyt toteutustavat häviävät parempien tieltä. Esitellyistä toteutustavoista äärelliset automaattit ovat hävinneet suurimmaksi osaksi peleistä. Syitä tähän on muun muassa uudelleenkäytön puute ja monimutkaisen käyttäytymisen vaatimus nykypeleissä, mikä johtaa äärellisten automaattien kohdalla tilaräjähdysoongelmaan. Niitä kuitenkin voidaan käyttää edelleen hyvin yksinkertaisten tekoälyjen toteutukseen tai osana jostain parempaa toteutustapaa. Äärellisten automaattien kaltaisista reaktiivisista toteutustavoista pelintekijöiden suosioon ovat nousseet käytöspuut, minkä voi havaita esimerkiksi siitä, että ne on sisällytetty Unreal Engine 4 -pelimoottorin kehitystyökaluihin.

Myös STRIPS-pohjaisen suunnittelun käyttö on vähentynyt asteittain F.E.A.R.-pelin menestyksestä johtuneen suosion hiivuttua. Syitä tähän ovat siihen liittyvät ongelmat, joita ovat esimerkiksi maailman kuvaukseen lisättävät ylimääräiset muututtajat ja suurempi suorituskysyvaatimus (Champandard, 2011; Sloan et al., 2011). Pelinkehittäjät siirtyivät STRIPS-pohjaisista suunnittelijoista hierarkkisia tehtäväverkkoja käyttävään suunnitteluun, koska se mahdollisti suunnittelijan paremman hallinnan ja paremman suorituskysyn.

Pelien suhteen on hyvä ymmärtää, että ei ole olemassa sellaista tekoälyn toteutustapaa, joka sopisi parhaiten jokaiseen erilaiseen toteutukseen. Jokaisella toteutustavalla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, ja käytettävä toteutustapa tulisi valita niiden perusteella.

Viitteet

- Champandard, A. J. (2007a). *Common ways to implement finite state machines in games*. Retrieved 14.11.2014, from <http://aigamedev.com/open/article/fsm-implementation/>
- Champandard, A. J. (2007b). *The gist of hierarchical FSM*. Retrieved 15.11.2014, from <http://aigamedev.com/open/article/hfsm-gist/>
- Champandard, A. J. (2011). *This year in game AI: Analysis, trends from 2010 and predictions for 2011*. Retrieved 1.12.2014, from <http://aigamedev.com/open/editorial/2010-retrospective/>

- Champanhard, A. J. (2013). *Planning in games: An overview and lessons learned*. Retrieved 24.11.2014, from <http://aigamedev.com/open/review/planning-in-games/>
- Epic Games. (2014). *Unreal Engine 4 documentation - behavior trees*. Retrieved 21.11.2014, from <https://docs.unrealengine.com/latest/INT/Engine/AI/BehaviorTrees/index.html>
- Erol, K., Hendler, J., & Nau, D. S. (1994a). HTN planning: Complexity and expressivity. In *AAAI* (Vol. 94, pp. 1123–1128).
- Erol, K., Hendler, J. A., & Nau, D. S. (1994b). *Semantics for hierarchical task-network planning* (Tech. Rep. Nos. CS-TR-3239, UMIACS-TR-94-31). Computer Science Dept., University of Maryland.
- Fikes, R. E., & Nilsson, N. J. (1972). STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial intelligence*, 2(3), 189–208.
- Girault, A., Lee, B., & Lee, E. (1999). Hierarchical finite state machines with multiple concurrency models. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 18(6), 742–760.
- Harel, D. (1987). Statecharts: A visual formalism for complex systems. *Science of Computer Programming*, 8(3), 231–274.
- Hart, P., Nilsson, N., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100–107.
- Hopcroft, J. E., Motwani, R., & Ullman, J. D. (2003). *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation* (2nd ed.). Pearson/Addison Wesley.
- Hu, W., Zhang, Q., & Mao, Y. (2011). Component-based hierarchical state machine – a reusable and flexible game AI technology. In *Proceedings of the 6th IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference, 2011* (Vol. 2, pp. 319–324).
- Kelly, J. P., Botea, A., & Koenig, S. (2008). Offline planning with hierarchical task networks in video games. In *Proceedings of the Fourth Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference*. Retrieved from <http://www.aaai.org/Papers/AIIDE/2008/AIIDE08-010.pdf>
- Lim, C.-U., Baumgarten, R., & Colton, S. (2010). Evolving behaviour trees for the commercial game DEFCON. In *Proceedings of the 2010 International Conference on Applications of Evolutionary Computation - Volume Part I*, pp. 100–110.
- Nau, D., Au, T.-C., Ilghami, O., Kuter, U., Wu, D., Yaman, F., Munoz-Avila, H.,

- & Murdock, J. (2005). Applications of SHOP and SHOP2. *IEEE Intelligent Systems*, 20(2), 34–41.
- Nau, D., Cao, Y., Lotem, A., & Munoz-Avila, H. (1999). SHOP: Simple Hierarchical Ordered Planner. In *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2*, pp. 968–973.
- Nau, D. S., Au, T.-C., Ilghami, O., Kuter, U., Murdock, J. W., Wu, D., & Yaman, F. (2003). SHOP2: An HTN planning system. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 20, 379–404.
- Orkin, J. (2003). Applying goal-oriented action planning to games. In *AI Game Programming Wisdom 2*, pp. 217–228. Charles River Media.
- Orkin, J. (2006). Three states and a plan: the AI of F.E.A.R. In *Proceedings of Game Developers Conference*. Retrieved from http://alumni.media.mit.edu/~jorkin/gdc2006_orkin_jeff_fear.pdf
- Sloan, C., Kelleher, J. D., & Mac Namee, B. (2011). Feasibility study of utility-directed behaviour for computer game agents. In *Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 5:1–5:6.
- Ögren, P. (2012). Increasing modularity of UAV control systems using computer game behavior trees. In *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Minneapolis, Minnesota*, pp. 13–16.

Kappaleen haku digitaalisesta kuvasta konenäön avulla

Santeri Karjalainen

Tiivistelmä

Tässä tutkielmassa esittelen yhden tavan ennalta määrätyn kappaleen sijainnin määrittämiseen digitaalisesta kuvasta. Kappaleen haussa sovelletaan HSV-värimallia ja yhdistetyn komponentin ääriviivan ympyränmuotoisuutta. Tavoitteena on eristää kuvan sisältämästä informaatiosta kuvassa esiintyvän vihreän pallon ääriviivapisteiden joukko. Tutkielmaan liittyy tekemäni konenäkösovellus, joka toteuttaa tutkielmassa esitellyn menetelmän. Esimerkkisovelluksen toteutuksessa olen hyödyntänyt OpenCV-konenäkökirjastoa. Käytettävien menetelmien yhteydessä esittelen niihin kohdistuvaa tutkimusta ja niihin liittyviä ongelmia sekä OpenCV:n tarjoamia funktioita toiminnallisuuden toteuttamiseen.

Avainsanat ja -sanonnat: konenäkö, OpenCV, värimallit, HSV-väriavaruus, mediaanisuodatus, binäärikuva, ympyränmuotoisuus, ääriviiva-algoritmi

1 Johdanto

Ihminen hahmottaa ympäröivän maailmansa kokoelmana koherentteja kolmiulotteisia hahmoja, joten esineiden tunnistaminen sekä niiden luokittelu on ihmiselle arkipäiväinen asia. Oletukset ja ennalta kerätty tietämys maailmasta auttavat meitä tulkitsemaan näkemäämme ja muodostamaan järkeviä päätelmiä kaoottisestakin visuaalisesta syötteestä. Ihmismäisen visuaalisen aistin automatisointi on vuosikymmenien ajan ollut yksi merkittävimmistä tekoälytutkimuksen osa-alueista. Konenäön tutkimuksen avulla tavoitellaan sovelluksia, jotka kykenevät ymmärtämään näkemäänsä ja rakentamaan eksplisiittisiä kuvauksia näkemistään reaali maailman kohteista. (Ballard & Brown, 1982)

Konenäön tutkimus pyrkii kehittämään sovelluksia ja algoritmeja, jotka kykenevät muodostamaan relaation visuaalisesta syötteestä johonkin reaali maailman kohdetta kuvaavaan malliin tai käsitteeseen. Nämä mallit ja käsitteet ovat usein

abstrakteja, ja niiden kuvaaminen muodollisesti on hankalaa. (Ballard & Brown, 1982)

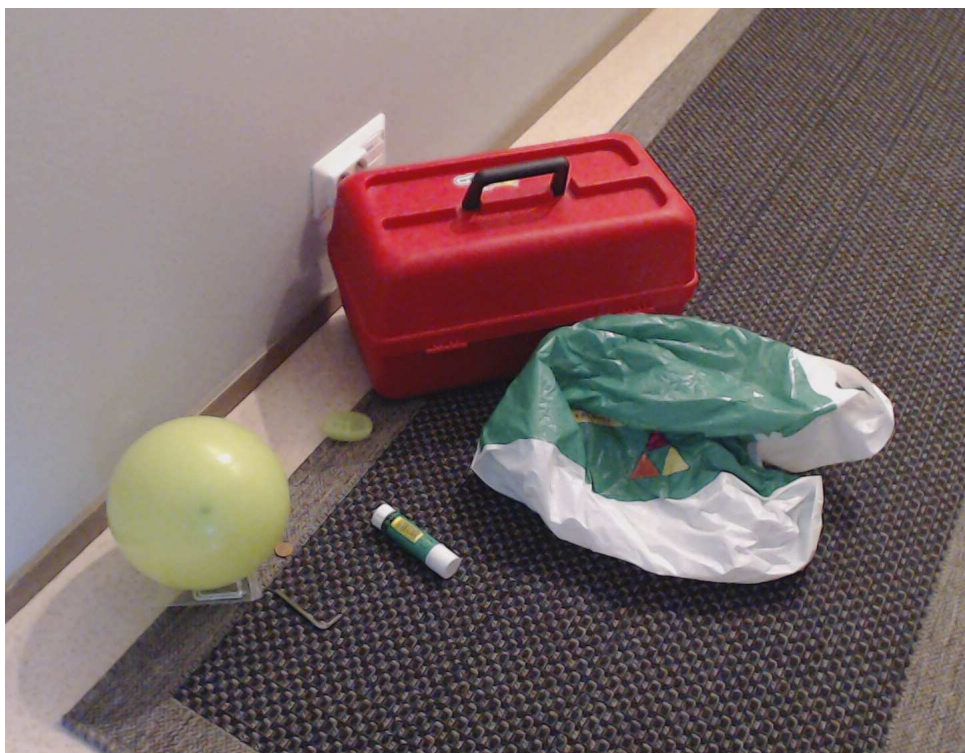
Jos tarkastellaan esimerkiksi mallia ”vihainen ilme”, voidaan todeta, että ihmiselle tällaisen mallin tunnistaminen kuvasta on helppoa. Jotta ”vihainen ilme” voitaisiin tunnistaa automaattisesti, täytyy visuaalisesta syötteestä ensin eristää tarvittava informaatio esimerkiksi prosessoimalla ja suodattamalla kuvaa. Tämä voi tarjota esimerkiksi kuvan rajaamista siten, että vain kuvattavan ihmisen kasvot ovat näkyvissä. Tämän jälkeen kuvasta voidaan esimerkiksi erotella ihmisen kasvojen osat, kuten kulmakarvat, silmät ja suu. Näiden osien mittojen ja sijaintien perusteella voidaan luoda käsitys siitä, kuinka paljon ”vihaisen ilmeen” mallia kyseiset kasvot muistuttavat.

Konenäköä sovelletaan laajalti esimerkiksi videovalvonnassa, valokuvauksessa, lääketieteessä, tuotantoteollisuudessa ja robotiikassa. Konenäön avulla voidaan esimerkiksi tunnistaa tähtiä ja planeettoja observatorion tuottamista kuvista, etsiä poikkeamia röntgenkuvista tai tunnistaa virheellisiä tuotteita tehtaan tuotantolinjalla. (Ballard & Brown, 1982)

Konenäön sovelluksissa on useita osia, jotka esiintyvät tietojenkäsittelyn sovelluksissa myös sellaisenaan. Konenäkö vaatii usein muun muassa kuvien prosessointia, koodausta ja siirtoa. Myös tilastolliset menetelmät ja hahmontunnistus ovat erittäin tärkeitä konenäön osia. Konenäön osat tukevat usein toisiaan, ja niiden muodostama ketju mahdollistaa relaation muodostamisen kuvadatan ja muodollisen mallin välille. (Ballard & Brown, 1982)

Tässä tutkielmassa esittelen yhden keinon pallon sijainnin määrittämiseen digitaalisesta kuvasta konenäön avulla. Kuten aiemmin totesin, esineiden tunnistaminen on ihmiselle pääsääntöisesti triviaali tehtävä. Esimerkiksi kuvaa 1 tarkasteltaessa vihreän pallon löytäminen ei vaadi kuin nopean silmäyksen. Tehtävänanto antaa kaksi eri attribuuttia etsittäväälle kappaleelle: väri ja muoto. Ihminen käyttää näitä ennakkotietoja luodakseen mallin esineestä, joka kuvasta tulisi löytää. Tässä tutkielmassa pyrin ratkaisemaan kappaleen paikantamiseen liittyvän ongelman näiden kahden attribuutin avulla. Kappaleen tunnistamisen ja paikantamisen heuristiikka muistuttaa siis ihmisen näköjärjestelmän käyttämää mallia.

Kappaleen tunnistamiseen sen ulkomuodon avulla on kehitetty useita metodeja (Roth & Winter, 2008), ja näistä jokaisella on omat hyvät ja huonot puolensa. Tämän tutkielman tapauksessa paikannettava esine on ennalta määriteltä, ja käytettävät menetelmät on rajattu kappaleen tunnistamiseen värin ja muodon perusteella. Esittelen kappaleen sijainnin määrittämiseen käytettävän menetelmän



Kuva 1. Useita esineitä sisältävä kuva

kahdessa vaiheessa: ensin käsittelen väriperustaista suodatusta, ja tämän jälkeen sovellan suodatettuun kuvaan ympyrän tunnistamiseen kehitettyä menetelmää.

Olen toteuttanut konenäkösovelluksen (Karjalainen, 2014), joka esittelee tutkielmassa käsiteltyjä kohteen tunnistamiseen käytettäviä menetelmiä OpenCV-konenäkökirjaston avulla. OpenCV on esitelty seuraavassa kohdassa. Sovellus on toteutettu C++-kielellä, ja sen tarkoituksena on esitellä, kuinka tutkielmassa kuvattuja asioita voidaan toteuttaa, eikä toimia täydellisenä esimerkkinä konenäkösovelluksesta. Tässä tutkielmassa esittelemiäni menetelmiä voitaisiin käyttää vaikkapa sovelluksessa, jonka tavoitteena on helpottaa kameran kohdistamista tiettyyn pisteeseen.

1.1 OpenCV-konenäkökirjasto

OpenCV on konenäkökirjasto, jonka Intel esitteli ensimmäisen kerran vuonna 2000 (Culjak, Abram, Pribanic, Dzapo, & Cifrek, 2012). Sitä käytetään nyttemmin laajalti ympäri maailmaa erilaisissa yritysten ja tutkimuslaitosten konenäkösovelluksissa. OpenCV:n tavoite on tarjota tehokkaita avoimen lähdekoodin konenäköalgoritmeja, sekä yhtenäistää konenäkösovellusten infrastruktuuria. Kirjastoon kuuluu yli 2500 optimoitua konenäköalgoritmia ja se sisältää C++, C-, Python-, Java- ja MATLAB

& OCTAVE-rajapinnat. Käyttöjärjestelmäalustoista OpenCV tukee Windowsia, Linuxia, Androidia ja Mac OS:ää. (Itseez, 2014)

Toteuttamani konenäkösovellus perustuu OpenCV-konenäkökirjastoon. Mielestäni tämänkaltaisen esimerkin kautta on mielekästä tutkia konenäköön liittyviä ongelmia. Konenäön sovellukset ovat usein luonteeltaan sellaisia, että käytettävien menetelmien tehokkuudesta ja toimintavarmuudesta on hankala muodostaa kuvaa pelkästään teorian avulla.

Kirjaston ja esimerkkisovelluksen esittely on rajattu konenäön kannalta mielekkäisiin osiin, ja käytettävistä luokista, metodeista ja funktioista on esitelty vain oleelliset. Voinen todeta, että esimerkkisovellus toimii hyvänä apukeinona tässä tutkielmassa käsittelemieni menetelmien esittelyssä. Muistinhallinnan, kääntämisen, testaamisen, grafiikkaprosessorille optimoimisen ja muut sovellustekniset osat olen sivuuttanut, sillä ne ovat tämän tutkielman kannalta vähemmän oleellisia.

2 Värin hyödyntäminen kuvan suodatuksessa

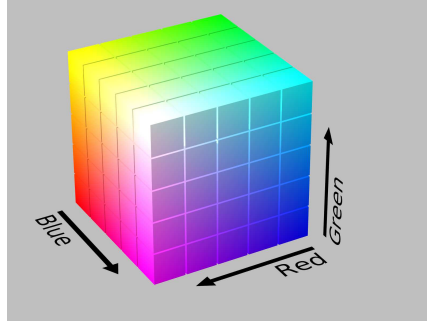
2.1 Värimallit

Värimallilla tarkoitetaan tapaa esittää ja luokitella värejä, ja se on luonteeltaan abstrakti matemaattinen malli. Tyypillisesti värimalli koostuu yhdestä tai useammasta reaaliarvosta ja muusta tarvittavasta informaatiosta, jotta värimallin avulla kuvattu väri voidaan tulkita väriavaruuden pisteeksi. Väriavaruus on yksi- tai useampiulotteinen avaruus, jonka kukin akseli vastaa yhtä väriä. (Joblove & Greenberg, 1978) Väriavaruus ja värimalli ovatkin läheisiä käsitteitä, ja yhdessä ne sisältävät tarvittavan informaation värien käyttämiseen tietojenkäsittelyn sovelluksissa.

Joblove ja Greenberg (1978) esittävät, kuinka värit voidaan kuvata ortogonaalisessa kolmiulotteisessa avaruudessa sijaitsevan kuution sisällä sijaitsevan pisteen koordinaatteina. Avaruuden akselit ovat kolme pääväriä, ja se on yksi monista väriavaruuksista. Värimallin avulla siis voidaan kuvata ja luokitella värejä, mutta vasta väriavaruuden avulla voidaan esittää todellisia värejä esimerkiksi tietokonegrafikan käyttöön. RGB-väriavaruus on esitetty kuvassa 2.

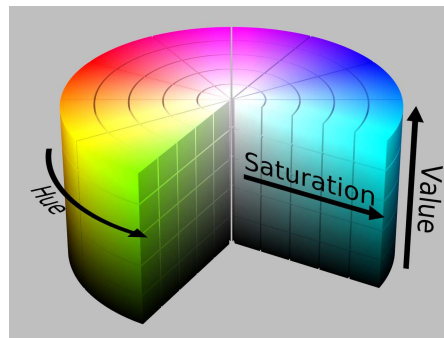
2.2 HSV-väriavaruus

HSV-väriavaruus on esitetty sylinterinä kuvassa 3. HSV-väriavaruudessa värin sävy on kuvattu luonteensa mukaisesti ympyrän kehälle, ja muut ominaisuudet (väriky-



Kuva 2. RGB-väriavaruus (Wikimedia Commons, 2010b)

läisyys ja kirkkaus) on kuvattu siten, että niille on olemassa minimi- ja maksimiarvot. Sylinterin säde määrää värikylläisyyden, ja sylinterin korkeus värin kirkkauden. Kuten RGB-väriavaruuden tapauksessa, HSV-väriavaruuden avulla kuvattu väri on yksittäinen piste tämän sylinterin sisällä. (Joblove & Greenberg, 1978)



Kuva 3. HSV-värimalli (Wikimedia Commons, 2010a)

HSV-väriavaruus on lineaarikuvaus RGB-väriavaruudesta. Tarkasteltaessa HSV-väriavaruutta eri sovelluksissa on siis tiedettävä tarkasti, kuinka arvot kuvautuvat HSV- ja RGB-avaruuksien välillä. (Tkalčič & Tasič, 2003)

Värisävyyn, värikylläisyyden ja kirkkauden yhdistelmä on ihmiselle luonnollisin tapa luokitella värejä (Tkalčič & Tasič, 2003). Tämä onkin yksi suurimmista HSV-värimallin ja HSV-väriavaruuden hyödyistä. Useat kaupalliset kuvankäsittelyohjelmat käyttävät juuri tästä syystä HSV-värimallia, ja OpenCV tarjoaa myös mahdollisuuden HSV-värimallin käyttöön.

2.3 Värimallin valinta konenäkösovelluksessa

Geversin ja Smeuldersin (1999) mukaan väri tarjoaa erittäin hyödyllistä tietoa kapaleen tunnistukseen. Värihistogrammien laskenta on yksi tapa hyödyntää värejä

kappaleen tunnistuksessa. Värin käyttö ei kuitenkaan ole täysin ongelmaton, sillä muuttuvilla valaistusolosuhteilla on merkittävä vaikutus värien jakaumaan kuvassa. Esimerkiksi suoraan edestä kirkkaalla valolla valaistu kappale näyttää lähes poikkeuksetta kirkkaammalta ja värikylläisemmältä kuin takaa päin valaistu kappale.

Geversin ja Smeuldersin (1999) tutkimusten pohjalta voidaan päätellä, että kappaleen tunnistamisen helpottamiseksi sen tulisi olla mahdollisimman tasavärinen ja mattapintainen, jotta heijastuksilta ja varjoilta välttyään. Tästä syystä olenkin valinnut tunnistettavaksi kappaleeksi yksivärisen pallon. Geversin ja Smeuldersin mukaan tapauksissa, joissa kuvattavaan kohteeseen ja valaistusolosuhteisiin voidaan vaikuttaa, tulisi käyttää erottelukykyisempiä värimalleja. RGB-värimalli soveltuu hyvin moniväristen kohteiden tunnistukseen, mutta yksiväristen kohteiden tapauksessa värisävy on erittäin erottelukykyinen attribuutti kuvien suodatukseen. Tästä syystä olen päättänyt hyödyntää HSV-värimallia tässä tutkielmassa ja tutkielman ohella laatimassani esimerkkisovelluksessa.

2.4 Väriperustainen suodatus OpenCV:llä

Tässä kohdassa on kuvattu, kuinka väriperustainen suodatus voidaan toteuttaa OpenCV:n avulla. Ensin kuva muunnetaan HSV-värimalliin, jonka jälkeen kuvasta suodatetaan haluttu värialue.

2.4.1 Kuvan muunnos HSV-värimalliin

OpenCV käsittelee kuvia `cv::Mat`-luokan avulla. `Mat`-luokan olio kuvaa n -ulotteista yksi- tai useampikanavaista taulukkoa. Luokan olioita voidaan käyttää mm. reaali- tai kompleksilukuvektorien, matriisien, mustavalko- tai värikuvien tallentamiseen ja esittämiseen. Kuvat säilötään useimmiten kaksiulotteiseen matriisiin, jossa yksittäinen alkio (eli yksittäinen pikseli kuvassa) sisältää yhdestä kolmeen kanavaa. (OpenCV dev team, 2014)

Mustavalkoisen kuvan tapauksessa käytössä on tyypillisesti yksi kanava. Jokainen mustavalkokuvan pikseli on siis määritelty kokonaislukuna, ja tämä kokonaisluku kuvaa pikselin kirkkautta. Yhden pikselin tallentamiseen käytetty muuttuja voi olla esimerkiksi 8-bittinen, etumerkitön kokonaisluku. (OpenCV dev team, 2014)

OpenCV käyttää värikuvien yhteydessä pääsääntöisesti RGB-värimallia, joskin kanavien järjestys on BGR. OpenCV:tä käytettäessä siis esimerkiksi videolähteestä siepattu kehys tallennetaan matriisiin, ja matriisin yksittäinen piste sisältää esimerkiksi kolmen 8-bittisen etumerkittömän kokonaisluvun vektorin. Tämän vekto-

rin alkiot ovat järjestyksessä sinisen, vihreän ja punaisen värikomponentin arvot. 8-bittisen etumerkittömän kokonaisluvun sijaan voidaan käyttää myös esimerkiksi 32-bittisiä liukulukuja. (Culjak et al., 2012)

`Mat`-olioon tallennettu digitaalinen värikuva voidaan muuntaa HSV-värimalliin `cv::cvtColor`-funktion avulla, joka on määritelty seuraavasti:

```
void cvtColor(InputArray src, OutputArray dst, int code, int
              dstCn=0).
```

Tässä `InputArray` ja `OutputArray` ovat välittäjäluokkia, joita useimmat OpenCV:n funktiot käyttävät. `InputArray` määrittelee vain-luku-tyyppisen taulukon, ja `OutputArray` määrittelee taulukon, jota voidaan sekä lukea että kirjoittaa. OpenCV käyttää näitä välittäjäluokkia laajalti eri funktioissa, ja käyttäjien ei tarvitse niistä liiemmin välittää. OpenCV rakentaa `Mat`-olioista automaattisesti `InputArray`- ja `OutputArray`-olioita tarpeen mukaan. Tämä tarkoittaa siis sitä, että esimerkiksi `cvtColor`-funktiolle voidaan antaa `Mat`-oliot sekä `src`- että `dst`-parametreina. (OpenCV dev team, 2014)

Värimallin muunnoksen suorittava funktio `cvtColor` saa siis parametrinaan kuvamatriisin `src`, jonka värimalli halutaan muuttaa, ja kohdekuvamatriisin `dst`, johon muunnettu kuva tallennetaan. Tämän lisäksi funktiolle tulee antaa parametrina `code`, joka määrittelee mistä väriavaruudesta mihin väriavaruuteen muunnos suoritetaan. Muunnettaessa RGB- tai BGR-väriavaruuksista HSV-väriavaruuteen käytetään koodeja `CV_RGB2HSV` ja `CV_BGR2HSV`. Parametri `dstCn` määrittelee kohdekuvamatriisiin päätyvien kanavien määrän, ja jos parametrin arvo on 0, kanavien määrä päätellään automaattisesti `src`- ja `code`-parametrien perusteella. (OpenCV dev team, 2014)

2.4.2 Halutun värialueen suodattaminen kuvasta

Kun kuva on muunnettu HSV-värimalliin, voidaan haluttu värialue eristää kuvasta. Tavoitteena on luoda binäärikuva, joka sisältää tarvittavan määrän informaatiota pallon muodon tulkitsemiseksi. Binäärikuva on määritelmänsä mukaisesti kuva, jonka pikseleille on vain kaksi mahdollista arvoa. Binäärikuva koostuu siis tasan kahdesta väristä, ja yksittäisen pikselin arvon tallentamiseen tarvitaan vähintään yksi bitti. Binäärikuvia käytetään tyypillisesti mustavalkokuvien esittämiseen, ja konenäön sovelluksissa niitä esiintyy useimmiten segmentoinnin tuloksena. Binäärikuvien analysointiin on kehitetty useita algoritmeja. (Shapiro & Stockman, 2014a)

OpenCV tallentaa binäärikuvat `Mat`-luokan olioona, kuten värikuvatkin. Binääri-

kuvien yhteydessä OpenCV käyttää tyypillisesti 8-bittistä etumerkitöntä kokonaislukua kuvaamaan yhtä pikseliä. Tällaisessa rakenteessa on siis mahdollista esittää myös harmaan sävyjä, mutta käsiteltäessä kuvaa binäärikuvana yksittäinen pikseli tulkitaan yleensä 1-pikseliksi, jos sen arvo on nollaa suurempi. Käytännössä OpenCV asettaa binäärikuvien yhteydessä yksittäisen pikselin 1-pikseliksi siten, että kyseisen pikselin kaikki kahdeksan bittiä ovat 1-bittejä. (OpenCV dev team, 2014)

OpenCV:n näkökulmasta värien suodattaminen on yksinkertainen tehtävä. Kuten aiemmin todettiin, OpenCV käsittelee kuvia matriiseina, jossa jokaiselle pikselille on $[1, n]$ kanavaa, jotka sisältävät esimerkiksi 8-bittisiä etumerkittömiä kokonaislukuja. Ennen värialueen suodatusta tulee määritellä jokaista lähdekuvan kanavaa kohden raja-arvot. Esimerkiksi HSV-värimallin tapauksissa määritellään siis ala- ja ylärajat jokaiselle kolmelle kanavalle (H, S ja V). Tämän jälkeen tarkistetaan kuvasta jokaisen pikselin kaikki kanavat, ja verrataan niitä sallittuihin arvoihin. Mikäli yksittäisen pikselin kaikki kanavat ovat sallittujen arvojen sisällä, voidaan tuloksena syntyvään binäärikuvaan asettaa 1-pikseli vastaavan pikselin kohdalle. (OpenCV dev team, 2014)

OpenCV tarjoaa värien suodatukseen mm. `cv::inRange`-funktion, joka on määriteltä seuraavasti:

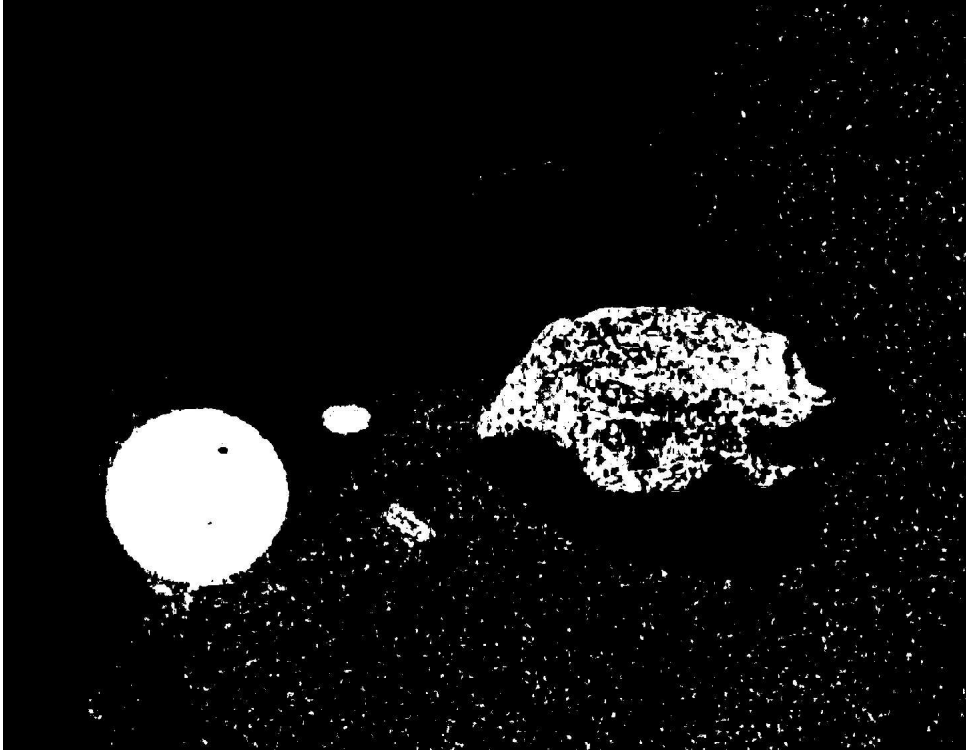
```
void inRange(InputArray src, InputArray lowerb, InputArray
             upperb, OutputArray dst).
```

Tässä `src` ja `dst` ovat jälleen lähdekuvamatriisi ja kohdekuvamatriisi. Kohdekuvan tulee olla tyyppiä `CV_8U`, eli 8-bittinen. Taulukot `lowerb` ja `upperb` määrittelevät raja-arvot, joita vasten lähdekuvamatriisin pikselien kanavat tarkistetaan. Näiden raja-arvotaulukoiden tulee sisältää yksi arvo jokaista kanavaa kohden. Samaa funktiota voidaan käyttää $[1, n]$ -kanavaisten kuvien suodattamiseen (OpenCV dev team, 2014). Esimerkiksi kolmikanavaisen kuvan tapauksessa funktio soveltaa kuhunkin pikseliin I seuraavaa sääntöä:

$$(1) \quad \begin{aligned} dst(I)_0 &= lowerb_0 \leq src(I)_0 \leq upperb_0 \wedge \\ &lowerb_1 \leq src(I)_1 \leq upperb_1 \wedge \\ &lowerb_2 \leq src(I)_2 \leq upperb_2. \end{aligned}$$

Kohdekuvamatriisin pikselin I ainoan kanavan kaikki kahdeksan bittiä ovat siis 1-bittejä, jos lähdekuvamatriisin pikselin I kaikkien kanavien (alaindeksit 0, 1 ja 2) arvot ovat suurempia tai yhtä suuria kuin `lowerb`:n vastaavat arvot, ja pienempiä

tai yhtä suuria kuin `upperb`:n vastaavat arvot. Raja-arvotaulukoina voidaan myös antaa kuvamatriisit, jolloin jokaiselle lähdekuvamatriisin pikselille on mahdollista määritellä omat raja-arvonsa. (OpenCV dev team, 2014)



Kuva 4. HSV-värimallin avulla suodatettu kuva

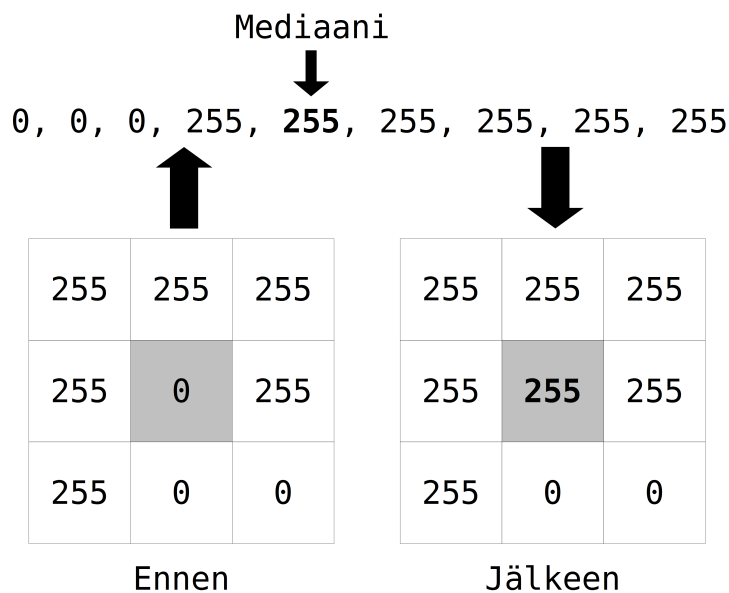
Kuvassa 4 on esitetty binäärikuva, joka syntyy, kun suodatetaan kuva 1 seuraavilla raja-arvoilla: $\text{lowerb}_0 = 24$, $\text{lowerb}_1 = 24$, $\text{lowerb}_2 = 24$, $\text{upperb}_0 = 84$, $\text{upperb}_1 = 255$, $\text{upperb}_2 = 255$. Kuvasta nähdään, kuinka tehokkaasti HSV-värimalli toimii. Väri tunnistetaan lähes yksinomaan sävyn perusteella. RGB-värimallia käytettäessä värin rajaaminen vastaavanlaisella lopputuloksella olisi huomattavasti hankalampaa, sillä RGB-värimallissa värikylläisyydelle ja kirkkaudelle ei ole erillisiä arvoja. Raja-arvojen määrittely vaatisi siis kaikkien kanavien raja-arvojen hienovarais-
ta säätöä, kun taas HSV-värimallissa pärjätään pelkän värisävyn määrittelyllä. Värikylläisyyden ja kirkkauden raja-arvot ovat erittäin anteeksiantavat, joka tekee suodatuksesta tarkkaa varjoista ja heijastumista huolimatta. Binäärikuvaan päätyy hieman kohinaa, joka näkyy yksittäisinä valkoisina pikseleinä. Kohina on peräisin alkuperäisestä kuvalähteestä, ja kohinan suodattaminen onkin kappaleen paikantamisen seuraava vaihe.

3 Binäärikuvan mediaanisuodatus

3.1 Mediaanisuodatus

Mediaani on järjestetyn lukujoukon keskimäinen alkio. Se on siis luku, joka jakaa joukon kahteen osaan siten, että toisen osan alkiot ovat suurempia tai yhtä suuria kuin mediaani, ja toisen osan luvut ovat vastaavasti pienempiä tai yhtä suuria kuin mediaani.

Mediaania hyödynnetään kuvankäsittelyssä ja konenäön sovelluksissa erityisesti *mediaanisuodatuksessa*. Mediaanisuodatuksessa kuvan yli liu'utetaan $n * n$ -kokoista ikkunaa, ja ikkunan keskimäisen pikselin uudeksi arvoksi asetetaan aina senhetkisen ikkunan sisältämien pikselien arvojen mediaani. Ikkunan koko n on tyypillisesti pariton luku, jotta ikkunan keskimäinen pikseli olisi yksikäsitteinen. (Ahmad & Sundararajan, 1987)



Kuva 5. Mediaanisuotimen toiminnan kuvaus yhden pikselin osalta

Kuvassa 5 on esitelty mediaanisuotimen toiminta yhden pikselin osalta. Kuvassa vasemmalla on yhdeksän pikselin ikkuna ennen mediaanisuodatusta, ja oikealla sama ikkuna keskimäisen pikselin mediaanisuodatuksen jälkeen. Yksinkertaisuuden vuoksi tässä tarkastellaan binäärikuvaa, joten pikseleillä on vain kaksi mahdollista arvoa: 0 ja 255. Ikkunoiden päällä on kuvattu vasemmanpuoleisen ikkunan pikselien arvot järjestettynä, ja joukosta on korostettu erikseen mediaani. Tämä mediaani on siis mediaanisuodatuksen jälkeen keskimäisen pikselin uusi arvo. Ikkunaa

siirretään tämän jälkeen eteenpäin, kunnes kaikki kuvan pikselit on käsitelty.

Shapiron ja Stockmanin (2014b) mukaan mediaanisuuodatus on erityisen hyödyllinen siksi, että se säilyttää kuvassa esiintyvät rajat ja ääriviivat, poistaen kuitenkin ääriviivojen rajaamissa alueissa esiintyvän kohinan. He mainitsevat mediaanisuuodatuksen olevan laskennallisesti jokseenkin raskas, mutta esimerkiksi Ahmad ja Sundararajan (1987) ovat kehittäneet nopean mediaanisuuodatusalgoritmin, joka on aikakompleksisuudeltaan lineaarinen.

3.2 Mediaanisuuodatus OpenCV:llä

OpenCV käyttää mediaanisuuodatuksen histogrammeihin perustuvaa algoritmia. Pikseli-ikkunan sisältämistä pikseleistä lasketaan histogrammi, jonka jälkeen histogrammista paikannetaan mediaani. Ikkunaa siirretään eteenpäin, ja histogrammista poistetaan ikkunan ulkopuolelle jäävät arvot. Samalla histogrammiin lisätään uudet ikkunan alle jääneet arvot. Tätä toistetaan, kunnes koko kuva on käsitelty. (OpenCV dev team, 2014)

OpenCV:llä mediaanisuuodatus voidaan suorittaa funktion `cv::medianBlur` avulla, joka on määritelty seuraavasti:

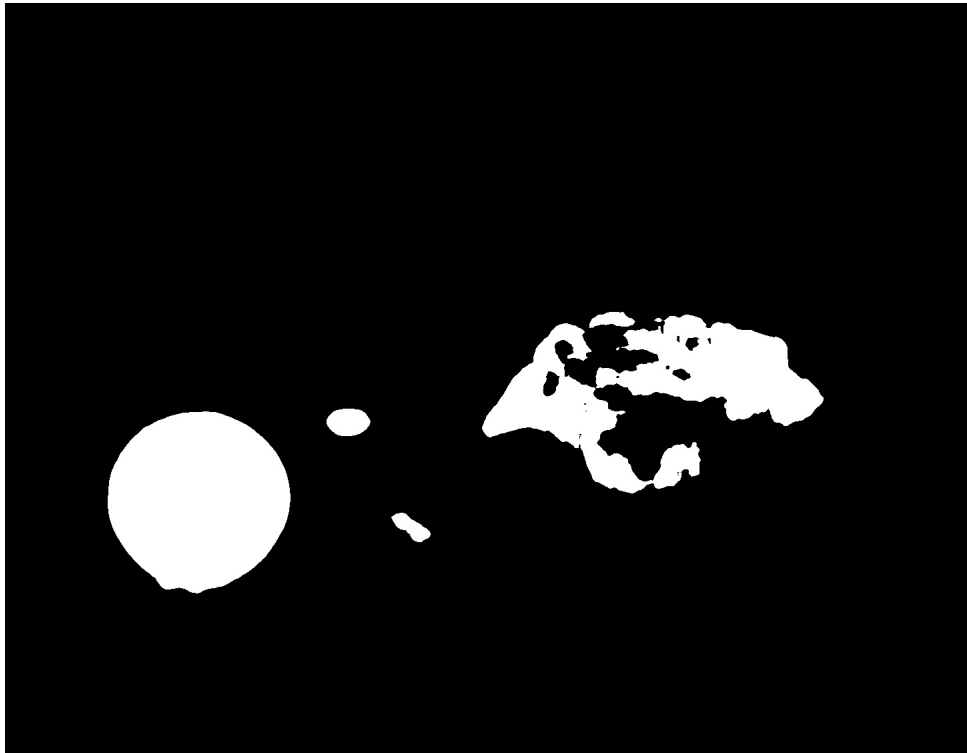
```
void medianBlur(InputArray src, OutputArray dst, int ksize).
```

Tässä funktiossa `src` ja `dst` ovat lähdekuva- ja kohdekuvamatriisi, ja `ksize` parametri määrittää mediaanisuuodatuksessa käytettävän ikkunan koon. OpenCV:n dokumentaatio (2014) mainitsee, että ikkunan koon on oltava pariton ja suurempi kuin yksi. Tämä johtuu kohdassa 3.1 mainitusta tarpeesta keskimmäisen pikselin yksikäsitteisyydelle. Tärkeää on huomata, että monikanavaisen kuvan tapauksessa OpenCV suorittaa mediaanisuuodatuksen jokaiselle kanavalle erikseen.

Kuvassa 6 on esitetty, miten mediaanisuuodatus ikkunakoolla 30×30 vaikuttaa sovellettuna kuvaan 4. Kuvassa esiintynyt kohina on hävinnyt, ja jäljellä on pelkästään merkittävän isoja yhdistettyjä komponentteja. Tätä kuvaa tarkasteltaessa on helppo huomata, miten tähän mennessä sovelletut suodatusmenetelmät vaikuttavat kuvaan. Kuvasta 6 pallon tunnistaminen on ihmisellekin selvästi helpompi tehtävä, sillä ylimääräistä informaatiota on suodatettu pois huomattavasti.

4 Ympyrän tunnistaminen binäärikuvasta

Pallon tunnistaminen binäärikuvasta vaatii kuvan sisältämien yhdistettyjen komponenttien ympyränmuotoisuuden tarkastelua. Tässä luvussa esittelen, kuinka binää-



Kuva 6. Mediaanisuodatettu binäärikuva

rikuvan sisältämien yhdistettyjen komponenttien joukosta voidaan valita se, joka muistuttaa eniten etsittyä kappaletta, eli palloa.

Konenäön sovelluksissa yksi yleisimmistä ympyrän tunnistukseen käytetyistä algoritmeista on Hough-muunnos ympyröille. Sen tavoitteena on löytää digitaalisesta kuvasta ympyrän kaltaisia muotoja, joilla on annettu säde r . Hough-muunnoksesta ympyröille on kehitetty useita variantteja, joista osa keskittyy parantamaan ympyrän tunnistuksen luotettavuutta, ja osa keventämään algoritmin laskennallista vaativuutta. (Atherton & Kerbyson, 1999)

OpenCV (OpenCV dev team, 2014) toteuttaa Hough-muunnoksesta ympyröille Yuen ja muiden (1990) kuvaileman 2-1 Hough -muunnoksen. Bradski ja Kaehler (2008) esittelevät kirjassaan OpenCV:n toteuttamaa Hough-muunnosta tarkemmin, ja he osoittavat mielestäni hyvin, kuinka monimutkaisesta algoritmista on kyse. Hough-muunnos ympyröille vaatii useita parametreja, ja näiden parametrien säätö siten, että Hough-muunnos tuottaa haluttuja tuloksia, on omien kokemuksieni perusteella useissa tapauksissa hankalaa.

Tässä tutkielmassa olen päättänyt käyttämään Hough-muunnoksen sijaan yksinkertaisempaa, mielestäni intuitiivisempaa menetelmää ympyrän muodon tunnistamiseksi binäärikuvasta. Ympyrän tunnistaminen voidaan jakaa kahteen vaiheeseen:

1. etsitään binäärikuvasta kullekin yhdistetylle komponentille ääriviiva
2. muodostetaan kullekin ääriviivalle ääriviivan ympyränmuotoisuutta kuvaava suhdeluku.

Vaihe 1 tähtää informaation keräämiseen binäärikuvan sisältämistä yhdistetyistä komponenteista. Vaiheessa 2 hyödynnetään erästä täydellisen ympyrän ominaisuutta, jotta voidaan tehdä päätelmä komponentin ympyränmuotoisuudesta. Nämä vaiheet on kuvattu kohdissa 4.1 ja 4.2.

4.1 Yhdistettyjen komponenttien ääriviivojen haku binäärikuvasta

Ääriviivojen hakeminen binäärikuvasta on laajalti tutkittu konenäön ongelma, sillä se tarjoaa useita sovellusmahdollisuuksia esimerkiksi hahmontunnistukseen ja kuvadatan pakkaamiseen. Digitaalisten binäärikuvien tapauksessa ääriviiva-algoritmit pyrkivät etsimään jokaiselle kuvassa esiintyvälle yhdistetylle komponentille sarjan koordinaatteja, jotka vastaavat komponentin ääriviivoja. Ääriviiva-algoritmit pyrkivät myös tyypillisesti selvittämään kuvassa esiintyvien yhdistettyjen komponenttien välisen topologisen rakenteen. (Suzuki & Abe, 1985)

Ääriviivanseuranta-algoritmillä tarkoitetaan tässä luvussa algoritmia, joka seuraa yhdistettyyn komponentin ääriviivaan kuuluvasta pisteestä (x, y) yhdistetyn komponentin ääriviivaa joko myötä- tai vastapäivään. Algoritmin suorituksen tuloksena saadaan järjestetty lista, joka koostuu komponentin ääriviivaan kuuluvista pisteistä. Ääriviiva-algoritmillä taas tarkoitetaan laajempaa algoritmia, joka hakee annetusta kuvasta kaikki yhdistettyjen komponenttien ääriviivat.

OpenCV (OpenCV dev team, 2014) toteuttaa ääriviivojen hakuun Suzukin ja Aben (1985) esittämän ääriviiva-algoritmin, joka on laajennettu versio Rosenfeldin ja Kakin (1982) ääriviivanseuranta-algoritmista. Suzukin ja Aben (1985) algoritmin tehokas topologisen rakenteen analyysi ei ole tämän tutkielman kannalta oleellinen, sillä topologista rakennetta ei hyödynnetä kuvaa analysoidessa.

4.1.1 Suzukin ja Aben algoritmin kuvaus

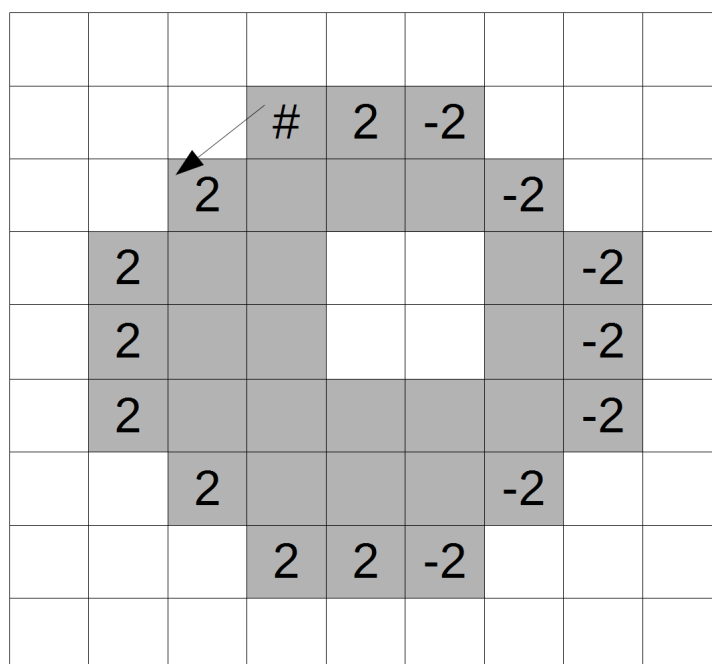
Suzukin ja Aben (1985) esittelemä ääriviiva-algoritmi käsittelee annetun binäärikuvan aloittaen kuvan vasemmasta ylänurkasta, pikselikoordinaateista $(0, 0)$, edeten rivi kerrallaan, kunnes algoritmin suoritus päättyy kuvan pikselikoordinaatteihin $(m - 1, n - 1)$, missä m on kuvan pystyresoluutio ja n kuvan vaakaresoluutio.

Algoritmin suorituksen ensimmäinen vaihe on ääriiviivanseurauspisteen etsiminen. Tällä tarkoitetaan ensimmäistä kohdattua pikseliä (i, j) , joka täyttää seuraavan ehdon: (i, j) on 1-pikseli ja $(i, j - 1)$ on 0-pikseli. Kun tällainen pikseli kohdataan, ääriiviivaa seurataan klassisen ääriiviivanseuranta-algoritmin mukaisesti, joka on kuvattu mm. Rosenfeldin (1970) teoksessa.

Suzukin ja Aben (1985) ääriiviiva-algoritmin merkittävä piirre on se, kuinka ääriiviiva seurattaessa kohdatut pikselit merkitään. Ääriiviivanseuranta-algoritmin edetessä yhdistetyn komponentin ympäri vastapäivään, uusi ääriiviivajoukkoon lisätty pikseli koordinaateissa (i, j) merkitään numerolla -2 , jos pikseli (i, j) on pikselin $(i, j + 1)$ sisältävän 0-komponentin ja pikselin (i, j) sisältävän 1-komponentin välissä. Muutoin pikseli (i, j) merkitään numerolla 2. Jos ääriiviivanseuranta-algoritmi kohtaa jo merkityn pikselin, seuranta lopetetaan.

Kun ensimmäinen ääriiviiva on kohdattu, algoritmi etenee hyödyntäen edellä kuvattua merkintätapaa pelkästään uloimpien ääriviivojen tunnistamiseksi. Kuten aiemmin mainittiin, algoritmi etenee binäärikuvassa rivi kerrallaan, käyden kunkin rivin kaikki sarakkeet läpi. Mikäli kohdattu pikseli kuuluu aiemmin tulkittuun ääriiviivaan, ääriiviivanseuranta ei aloiteta, vaan pikselille annettu numero (2 tai -2) otetaan talteen muuttuinaan x . Jos 0-pikselin oikealla puolella koordinaateissa (i, j) kohdataan 1-pikseli, kyseinen 1-pikseli on osa ulommaista ääriiviivaa, jos kaikki pikselit koordinaateissa $(i, 0), (i, 1), \dots, (i, j - 1)$ ovat 0-pikseleitä, tai viimeisimmän kohdatun ääriviivapikselin numero x on -2 . Molempien ehtojen tarkistaminen on triviaalia, mikäli aina uudelle riville siirryttäessä alustetaan viimeisimmän kohdatun ääriviivapikselin merkiksi $x - 2$. (Suzuki & Abe, 1985)

Kuvassa 7 on esitetty, kuinka Suzukin ja Aben (1985) algoritmi merkitsee yhdistetyn komponentin ääriviivapikselit. Yhdistetty komponentti on korostettu harmaalla (nämä ovat siis 1-pikseleitä), ja muu alue on 0-pikseleistä koostuvaa taustaa (eli siis 0-komponentti). Ääriiviivanseurauspiste on merkitty ristikkomerkillä (#). Tämän jälkeen ääriiviivanseuranta-algoritmi on edennyt yhdistetyn komponentin ympäri päinvastaiseen suuntaan. Koska komponentin ääriviivan pikselit on merkitty edellä kuvatun mallin mukaisesti, komponentin sisällä olevan $2 * 2$ kokoisin 0-komponentin ääriviivoja ei ole huomioitu. Algoritmin kohdattua tämän 0-komponentin, viimeisimmän kohdatun ääriviivapikselin numero x on ollut 2, joten ääriiviivanseuranta ei ole aloitettu. Näin päästään lopputulokseen, jossa yhdistetyn komponentin ääriviivoiksi on tulkittu pelkästään pikselit, jotka on merkitty joko numerolla 2, numerolla -2 tai ristikkomerkillä.



Kuva 7. Yhdistetyn komponentin ääriviivojen merkitätapa

4.1.2 OpenCV ja ääriviivojen haku

OpenCV tarjoaa ääriviivojen hakuun edellä kuvattua Suzukin ja Aben (1985) algoritmia hyödyntävän `cv::findContours`-funktion, joka on määritelty seuraavasti:

```
void findContours(InputOutputArray image,
    OutputArrayOfArrays contours, OutputArray hierarchy, int
    mode, int method, Point offset=Point()).
```

Tärkeää on huomata, kuinka funktiolle annettava analysoitava 8-bittinen yksikanavainen kuva `image` on sekä luettavissa että kirjoitettavissa. OpenCV:n dokumentaatio (2014) mainitsee, että funktio muokkaa kuvaa. Tämä on tärkeää ottaa huomioon funktiota käytettäessä. Mikäli tätä funktiota sovelletaan kuvaan, jota halutaan käsitellä lisää, on syytä ottaa kuvasta kopio.

Funktio saa parametreinaan myös kaksiulotteisen taulukon `contours`, johon kerätään yhdistettyjen komponenttien ääriviivat, sekä taulukon `hierarchy`, johon funktio tallentaa tarvittaessa tietoa ääriviivojen muodostamasta topologisesta hierarkiasta. Funktion parametri `mode` määrittää funktion toimintaperiaatteen. Tämän tutkielman tapauksessa olemme kiinnostuneita OpenCV:n dokumentaation mainitsemasta `CV_RETR_EXTERNAL` toimintaperiaatteesta, joka hakee vain uloimmat ääriviivat. (OpenCV dev team, 2014)

Lisäksi funktiolle voidaan määritellä ääriivakoordinaattien approksimointimetodi `method`, joka määrää, tallennetaanko ääriivakoordinaateista kaikki vai tiivistetäänkö koordinaattien joukkoa esimerkiksi siten, että päällekkäisistä, vierekkäisistä ja diagonaalisista ääriivakoordinaattien joukoista tallennetaan vain päätepisteet. Parametrilla `offset` voidaan määritellä funktion palauttamiin ääriivapisteisiin jokin siirros, jos esimerkiksi tarkastellaan jotain alkuperäisestä kuvasta rajattua aluetta. (OpenCV dev team, 2014)

Funktion `findContours` suorituksen jälkeen kaksiulotteinen taulukko `contours` sisältää kaikki algoritmin löytämät ääriviivat siten, että taulukon rivi `contours[i]` koostuu yksittäisen yhdistetyn komponentin ääriviivan pikselikoordinaateista. Kuvassa 8 on esitetty `findContours`-funktion kuvasta 6 löytämät ääriviivat siten, että kunkin yhdistetyn komponentin ääriviivat on piirretty kuvaan eri värillä.



Kuva 8. Yhdistettyjen komponenttien ääriviivat

4.2 Yhdistetyn komponentin ympyrämuotoisuuden määrittäminen

Kaksiulotteisen yhdistetyn komponentin ympyrämuotoisuudella (*circularity*) tarkoitetaan sitä, kuinka lähellä täydellistä ympyrää komponentin muoto on. Ympyrämuotoisuuden määrittämiseen komponentin ääriviivojen perusteella on useita

keinoja. Voidaan esimerkiksi tutkia yhdistetyn komponentin pinta-alaa suhteessa sen ääriivipisteet sisäänsulkevan ympyrän pinta-alaan. Partikkelien muotojen ja morfologian deskriptiivisiä ja kvantitatiivisia esityksiä koskeva ISO 9276-6 standardi määrittelee ympyränmuotoisuuden seuraavasti:

$$(2) \quad C = \sqrt{\frac{4\pi A}{P^2}},$$

missä A on komponentin pinta-ala ja P on komponentin ääriviivan pituus. (Olson, 2011)

Tämä ympyränmuotoisuuden arvo C kasvaa yhdistetyn komponentin muodon lähestyessä täydellistä ympyrää. Toisaalta Olson (2011) toteaa arvon kasvavan myös sellaisissa tapauksissa, joissa monikulmion sivujen määrä lähestyy ääretöntä. Esimerkiksi erilaisille ellipseille laskettu arvo on huomattavan suuri, mutta se kasvaa edelleen ellipsin ympyränmuotoisuuden kasvaessa.

4.2.1 Komponentin ääriviivan pituuden laskenta

Jotta edellä kuvattu ympyränmuotoisuutta kuvaava arvo C voidaan laskea, tarvitsee määritellä yhdistetyn komponentin ääriviivan pituus. Ääriviivajoukon $S = \{(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{n-1}, y_{n-1})\} \in \mathbb{R}^2$ pisteiden välisen etäisyyden summa voidaan laskea soveltaen Pythagoraan lausetta:

$$(3) \quad P = \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{(x_i - x_{(i+1) \bmod (n+1)})^2 + (y_i - y_{(i+1) \bmod (n+1)})^2}.$$

Ääriviivan oletetaan siis olevan suljettu, eli summaan lasketaan mukaan viimeisen pisteen etäisyys ääriviivajoukon ensimmäiseen pisteeseen jakojäännöksen (*modulo*) avulla. (Spector, 2014)

4.2.2 Komponentin ääriviivan rajaaman pinta-alan laskenta

Yhdistetyn komponentin ympyränmuotoisuuden C määrittäminen vaatii edelleen komponentin ääriviivan rajaaman pinta-alan A laskennan. Ääriivipisteiden joukko S sisältää n pistettä, joten se muodostaa n -kulmion. Tällaisen n -kulmion rajaama pinta-ala A voidaan laskea käyttäen Gaussin pinta-alakaavaa (*Gauss's area formula*):

$$(4) \quad A = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(x_i + x_{(i+1) \bmod (n+1)}) + (y_i + y_{i+1 \bmod n+1})}{2}.$$

On tärkeää huomata, että kaava ei ole symmetrinen, eli sen käyttäminen monimutkaisen monikulmion (*complex polygon*) pinta-alan laskentaan saattaa antaa virheellisiä tuloksia. (Norton, 2014)

Gaussin pinta-alakaava voidaan johtaa Greenin teoreemasta, jota hyödynnetään laajalti esimerkiksi fysiikan alalla. Kaavasta käytetään myös nimitystä maanmittaajan kaava (*surveyor's area formula*) sekä kengännauhakaava (*shoelace formula*). (Norton, 2014; Braden, 1986)

4.3 Yhdistetyn komponentin ympyränmuotoisuuden tutkiminen OpenCV:llä

OpenCV tarjoaa valmiit funktiot ääriviivan pituuden P sekä ääriviivan rajaaman pinta-alan A laskentaan. Näiden funktioiden avulla voidaan laskea edellä kuvattu yhdistetyn komponentin ympyränmuotoisuutta kuvaava arvo C . Funktiot hyödyntävät edellä kuvattuja menetelmiä. (OpenCV dev team, 2014)

OpenCV:n funktio `cv::arcLength` laskee pistejoukon muodostaman viivan pituuden. Funktio on määritelty seuraavasti:

```
double arcLength(InputArray curve, bool closed).
```

Tässä funktiossa `curve` on taulukko, joka sisältää ääriviivan pisteet järjestyksessä. On tärkeää huomata, että OpenCV tulkitsee taulukkoa siten, että taulukon ensimmäinen alkio on ääriviivan ensimmäinen piste, ja taulukon viimeinen alkio on ääriviivan viimeinen piste. Parametri `closed` määrittää onko kyseessä suljettu vai avoin viiva. Avoimen viivan tapauksessa viivan pituuteen ei lasketa viimeisen ja ensimmäisen pisteen etäisyyttä. Funktio palauttaa viivan pituuden double-tyyppisenä liukulukuna. (OpenCV dev team, 2014)

Ääriviivan rajaaman pinta-alan laskentaan OpenCV tarjoaa `cv::contourArea`-funktion. Funktio käyttää alakohdassa 4.2.2 esiteltyä menetelmää pinta-alan laskentaan, ja OpenCV:n dokumentaatio mainitsee funktion antavan mitä todennäköisimmin vääriä tuloksia monimutkaisten monikulmioiden tapauksessa. Dokumentaation mukaan `contourArea`-funktio on määritelty seuraavasti:

```
double contourArea(InputArray contour, bool oriented=false).
```

Funktio saa parametrina `contour` taulukon, joka sisältää ääriviivan pisteet. Aivan kuten `arcLength`-funktion tapauksessa, taulukko sisältää ääriviivan pisteet järjestyksessä siten, että taulukon ensimmäinen alkio on ääriviivan ensimmäinen piste, ja viimeinen alkio on ääriviivan viimeinen piste. Parametrilla `oriented` voidaan määrittää, palauttaako funktio absoluuttisen vai etumerkillisen arvon pinta-alalle. Funktion avulla voidaan siis tutkia, rajaavatko `contours` taulukon pisteet alueen myötä- vai vastapäivään. (OpenCV dev team, 2014)

4.4 Ympyränmuotoisimman yhdistetyn komponentin valinta

Kohdassa 4.2 esiteltyjä menetelmiä hyödyntämällä voidaan etsiä yhdistettyjen komponenttien ääriviivojen joukosta se, joka muistuttaa muodoltaan eniten kuvasta esittävää kappaletta, eli palloa. Binäärikuvan sisältämien yhdistettyjen komponenttien joukossa ei välttämättä ole yhtään täydellistä ympyrää. Tästä syystä on tarpeen vertailla ääriviivoille laskettua ympyränmuotoisuutta ja vertailla näitä arvoja parhaimman tapauksen löytämiseksi. Tätä voidaan kuvata algoritmissa 1 esitellyllä pseudokoodilla.

Algoritmi 1 Ympyränmuotoisimman ääriviivan haku ääriviivojen joukosta

```

1: function ETSIYMPYRÄ(ääriviivat[], minC, minA)
2:    $maxC \leftarrow 0$ 
3:    $löydetty \leftarrow 0$ 
4:   for ääriviiva in ääriviivat do
5:      $c \leftarrow \text{ympyränmuotoisuus}(\text{ääriviiva})$ 
6:      $a \leftarrow \text{pintaAla}(\text{ääriviiva})$ 
7:     if  $minC < c$  and  $minA < a$  and  $maxC < c$  then
8:        $löydetty \leftarrow \text{ääriviiva}$ 
9:        $maxC \leftarrow c$ 
10:  return  $löydetty$ 

```

Algoritmissa 1 esitetyllä pseudokoodilla pyritään siis etsimään ääriviiva, jonka

1. rajaama pinta-ala ylittää parametrina annetun pinta-alan raja-arvon $minA$
2. ympyränmuotoisuuden arvo ylittää parametrina annetun ympyränmuotoisuuden raja-arvon $minC$

3. ympyränmuotoisuuden arvo on suurin kohdat 1. ja 2. täyttävien ääriviivojen joukossa.

Algoritmin 1 palauttama ääriviiva rajaa kuvasta etsityn kappaleen. Funktiossa on käytetty kahta apufunktiota, `ympyränmuotoisuus` ja `pintaAla`, jotka perustuvat kohdassa 4.2 esiteltyihin menetelmiin.

Kuvassa 9 on esitetty alkuperäinen kuva 1, johon on sovellettu tässä tutkielmassa kuvaamiani menetelmiä. Kuvasta tunnistettu vihreä pallo on korostettu piirtämällä sille punainen ääriviiva.



Kuva 9. Useita esineitä sisältävästä kuvasta tunnistettu pallo

5 Yhteenveto

Kappaletta kuvaava malli on tärkein kappaleen tunnistuksen komponentti. Suurimpana haasteena on digitaalisessa kuvassa esiintyvän informaation käsittely ja suodatus siten, että kappale voidaan täsmätä käytettyyn malliin, vaikka ulkoiset tekijät kuten valaistus ja kappaleen asento vaikuttavat merkittävästi kappaleen ulkonäköön. Uusimmat kappaleen seurantaan kehitetyt konenäköalgoritmit luottavat dynaamisiin malleihin, joiden avulla voidaan luoda ennusteita siitä, miltä kappale näyttää esimerkiksi erilaisissa valaistusolosuhteissa. (Wang, Chen, Xu, & Yang, 2011)

Tässä tutkielmassa esittelemäni värisuodatuksen ja kappaleen ääriivioihin perustuva menetelmä toimii hyvin silloin, kun kappaleen muoto kuvassa ei muutu sen asennon muuttuessa. Erityisesti kappaleen kääntö jonkin tason suuntaisesti ei vaikuta kappaleen muotoon kuvassa, sillä paikannettavaksi kappaleeksi on määritetty tasavärinen pallo.

Wang ja muut (2011) listaavat tyypillisiä kappaleen paikantamiseen ja seurantaan liittyviä ongelmia ja niihin liittyviä ratkaisuja. Listattuna ovat esimerkiksi valaistuksen muutos, kappaleen epämuodostumat, kappaleen kääntö sekä kappaleen osittainen ja täydellinen peittyminen. Valaistukseen liittyviä väriteknisiä seikkoja käsiteltiin luvussa 2, ja HSV-värimallin käytön voidaankin todeta tuovan merkittävän edun erilaisissa valaistusolosuhteissa.

Luvussa 4 esitelty menetelmä yhdistetyn komponentin ympyränmuotoisuuden määrittämiseen on yksinkertainen, mutta sen toiminta esimerkiksi ellipsien tai koverien n -kulmioiden tapauksessa tekee siitä epätarkan. Esimerkiksi Wangin ja muiden (2011) mainitsema kappaleen osittainen peittyminen aiheuttaa ongelmia, sillä ympyränmuotoisuuden arvo C laskee huomattavasti pallon peittyessä siten, että sen muodostaman yhdistetyn komponentin ääriviivan pituus kasvaa huomattavasti pinta-alan vähentyessä. Esittelemäni menetelmän jatkokehityksen kannalta olisi mielekästä soveltaa esimerkiksi Rothin ja muiden (2008) esittelemiä malleja ympyrän tunnistuksessa.

Konenäköalgoritmeissa tehokkuus on usein merkittävä tekijä, ja erityisesti grafiikkaprosessorin ja rinnakkaisuuden hyödyntäminen ovat merkittäviä konenäön sovelluksissa käytettäviä optimointikeinoja (Pulli, Baksheev, Korniyakov, & Eruhimov, 2012). Tässä tutkielmassa esittelemäni menetelmä ei ota erityisesti kantaa tehokkuuteen, joskin esimerkiksi luvussa 3 esitelty mediaanisuodatus tehostaa kohdassa 4.1 esitellyn ääriviiva-algoritmin suoritusta. Menetelmän jatkokehityksen kannalta useiden erilaisten optimointitapojen tarkastelu olisi mielekästä, erityisesti käytettävissä

olevan laitteiston aiheuttaessa suorituskvyyllisiä rajoitteita.

Konenäkösovellukset saavuttavat mobiililaitteiden kautta yhä laajemman käyttäjajoukon, ja konenäön hyödyllisyydestä esimerkiksi tuotantoteollisuudessa ei liene epäselvyyttä (Pulli et al., 2012). Konenäkö on olennainen osa myös lisätyn todellisuuden sovelluksissa (Azuma, 1997). Laitteiston suorituskvyyyn kasvaessa voidaan konenäön avulla ratkoa entistä monimutkaisempia ongelmia, mutta algoritmien tehokkuuteen ja tarkkuuteen kohdistuu edelleen merkittävä määrä tieteellistä tutkimusta. Tekoälyn ja konenäön tutkimuksen edetessä päästään yhä lähemmäs konetta, jolla on ihmismäinen näkökyky.

Viitteet

- Ahmad, M., & Sundararajan, D. (1987). A fast algorithm for two dimensional median filtering. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 34(11), 1364–1374.
- Atherton, T., & Kerbyson, D. (1999). Size invariant circle detection. *Image and Vision Computing*, 17(11), 795–803.
- Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385.
- Ballard, D. H., & Brown, C. M. (1982). *Computer vision*. Prentice Hall.
- Braden, B. (1986). The surveyor’s area formula. *The College Mathematics Journal*, 17(4), 326–337.
- Bradski, G., & Kaehler, A. (2008). *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. O’Reilly Media.
- Culjak, I., Abram, D., Pribanic, T., Dzapo, H., & Cifrek, M. (2012). A brief introduction to OpenCV. In *Proceedings of the 35th International MIPRO Convention*, pp. 1725–1730.
- Gevers, T., & Smeulders, A. W. (1999). Color-based object recognition. *Pattern Recognition*, 32(3), 453–464.
- Itseez. (2014). *OpenCV*. Retrieved 2014-11-7, from <http://opencv.org/>
- Joblove, G. H., & Greenberg, D. (1978). Color spaces for computer graphics. In *Proceedings of the 5th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 20–25.
- Karjalainen, S. (2014). Konenäkösovellus pallon hakuun digitaalisesta kuvasta. Saatavilla osoitteesta <http://www.uta.fi/sis/reports/R34.html>.

- Norton, A. (2014). Green's Theorem and Area of Polygons. Retrieved 2014-11-25, from <http://math.blogoverflow.com/2014/06/04/greens-theorem-and-area-of-polygons>
- Olson, E. (2011). Particle shape factors and their use in image analysis - Part 1: Theory. *Journal of GXP Compliance*, 15(3).
- OpenCV dev team. (2014). *OpenCV API reference*. Retrieved 2014-11-7, from <http://docs.opencv.org/modules/refman.html>
- Pulli, K., Baksheev, A., Korniyakov, K., & Eruhimov, V. (2012). Real-time computer vision with OpenCV. *Communications of the ACM*, 55(6), 61–69.
- Rosenfeld, A. (1970). Connectivity in digital pictures. *Journal of the ACM*, 17(1), 146–160.
- Rosenfeld, A., & Kak, A. C. (1982). *Digital picture processing*. Academic Press.
- Roth, P. M., & Winter, M. (2008). *Survey of appearance-based methods for object recognition*. Retrieved 2014-12-7, from http://machinelearning.wustl.edu/uploads/Main/appearance_based_methods.pdf
- Shapiro, L., & Stockman, G. (2014a). *Binary image analysis*. Retrieved 2014-11-28, from <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse576/book/ch3.pdf>
- Shapiro, L., & Stockman, G. (2014b). *Filtering and enhancing images*. Retrieved 2014-11-28, from <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse576/book/ch5.pdf>
- Spector, L. (2014). The Pythagorean distance formula. Retrieved 2014-11-25, from <http://www.themathpage.com/alg/pythagorean-distance.htm>
- Suzuki, S., & Abe, K. (1985). Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 30(1), 32–46.
- Tkalčić, M., & Tasić, J. F. (2003). Colour spaces - perceptual, historical and applicational background. In *The IEEE Region 8 EUROCON 2003. Computer as a Tool Proceedings* pp. 304–308.
- Wang, Q., Chen, F., Xu, W., & Yang, M.-H. (2011). An experimental comparison of online object-tracking algorithms. In *SPIE Optical Engineering + Applications* pp. 1–11.
- Wikimedia Commons. (2010a). *HSV color solid cylinder alpha lowgamma*. Retrieved 11-02-14, from http://commons.wikimedia.org/wiki/File:HSV_color_solid_cylinder_alpha_lowgamma.png (File: HSV color solid cylinder alpha lowgamma.png)

- Wikimedia Commons. (2010b). *RGB Cube Show lowgamma cutout a*. Retrieved 11-02-14, from http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGB_Cube_Show_lowgamma_cutout_a.png (File: RGB Cube Show lowgamma cutout a.png)
- Yuen, H., Princen, J., Illingworth, J., & Kittler, J. (1990). Comparative study of Hough transform methods for circle finding. *Image and Vision Computing*, 8(1), 71–77.

Toiveet täyttävä lomake – Katsaus sähköisiin lomakkeisiin ja niiden käytettävyyteen

Joonas Kemppainen

Tiivistelmä.

Käyttäjän tietojen kerääminen lomakkeen avulla on olennainen ja välttämätön osa yhä useampia verkkopalveluja. Tässä tutkielmassa tarkastellaan lomakkeiden suunnitteluun liittyviä hyviä käytänteitä sekä tutkimusta kirjallisuuskatsauksen muodossa.

Avainsanat ja -sanonnat: Lomake, käytettävyys

1. Johdanto

Sähköisten lomakkeiden määrä kasvaa internetissä jatkuvasti ja yritykset keräävät valtavasti tietoa lomakkeiden kautta, eikä meneillään oleva big data -buumi varmasti vähennä lomakkeiden tarvetta. Lomakkeet ovatkin usein arvokkaan ja tärkeän tiedon lähde tai vaihtoehtoisesti pakollinen kynnyks ennen verkkokaupassa suoritettavan ostotapahtuman loppuunsaattamista. Miksi käyttökokeuksen kannalta näin tärkeän asian toteuttamiseen käytetään niin vähän resursseja kuin tällä hetkellä tehdään? Jos lomakkeen täyttämisestä ei ole mahdollista saada miellyttävää, tulee suunnittelussa pyrkiä tehokkuuteen, virheiden minimointiin sekä samalla vähentää palvelusta poistuvien asiakkaiden määrää.

Oma innostukseni lomakkeita kohtaan heräsi viime kesänä sähköisten lomakkeiden käytettävyyttä käsittelevässä työpajassa. Kyseessä oli niin sanottu silmät avaava kokemus, en uskonut, että niin tylsästä aiheesta voi löytyä valtavasti mielenkiintoisia käytettävyysaspekteja.

Tutkielman toisessa luvussa käsitellään lyhyesti käytettävyyttä ja sitä, mitä se on. Kolmas luku käsittelee lomakkeita niin käyttötarkoituksen, peruskomponenttien kuin lomakkeen käytön helpottamista tukevia ominaisuuksia. Neljännessä luvussa yhdistetään kaksi edellä mainittua teemaa ja tarkastellaan lomakesuunnittelua käytettävyystutkimuksen näkökulmasta. Luvussa 5 tutkielman havainnot kootaan yhteen sekä pohditaan tulevaisuuden tutkimusaiheita.

2. Käytettävyys

Käytettävyys voidaan ilmaista laadullisena attribuuttina sille, kuinka helppoa jokin tuote tai palvelu on käyttää. Tarkemmin määriteltynä käytettävyys viittaa siihen, kuinka helposti käyttäjät oppivat käyttämään jotain, kuinka tehokkaita he ovat sitä käyttäessään, kuinka helposti sen toiminta on muistettavissa, kuinka virhealtis se on ja kuinka paljon käyttäjät pitävät sen käyttämisestä [Nielsen *et al.*, 2006]. Edellä mainittujen seikkojen johdosta tuotteen tai palvelun käyttö-tarkoitus ja käyttäjädemografia määräävät omalta osaltaan ominaisuuksia, joiden perusteella käytettävyyttä voidaan mitata.

Suunnitellun käyttäjäryhmän fyysiset ja henkiset eroavaisuudet vaikuttavat käytettävyystekijöiden suunnitteluun, mutta myös esimerkiksi kulttuurien väliset erot tulee huomioida suunniteltaessa kansainvälisiä palveluita. Se, mikä nähdään jossain ympäristössä hyvänä käytettävyytenä, voi olla toisaalla täysin päinvastaisessa asemassa riippuen esimerkiksi värien merkityksen tai lukusuunnan muuttuminen [Barber *et al.*, 1998].

Käytettävyys on suurelta osin kuitenkin subjektiivinen käsite, ja sen mittaamiseen on kehitetty lukuisia erilaisia menetelmiä, joiden käyttämisen mielekkyys riippuu testattavan aiheen luonteesta. Käytettävyystestauksen menetelmiä käydään myöhemmin lyhyesti läpi pääosin lomakkeiden testaamisen kannalta.

3. Lomakkeen anatomia

Sähköiset lomakkeet ovat nykyään olennaisena osana lukemattomia verkossa toimivia palveluita. Suurin osa ihmisistä täyttääkin vähintään yhden lomakkeen joka päivä. Huonosti suunnitellut lomakkeet tuottavat usein virheellistä tietoa, aiheuttavat saman tiedon tallentamista useaan kertaan sekä käyttäjien turhautumista ja palvelun käytön lopettamista [Jarrett *et al.*, 2008].

3.1 Lomakkeen käyttötapauksia

Jarrett ja muut [2008] toteavat ihmisten tunnistavan lomakkeen sellaisen nähdessään. He kuvaavat lomaketta verkkosivuksi, jonka sisältämiin laatikkoihin on mahdollista kirjoittaa. Radiopainikkeet ja pudotusvalikot kuuluvat myös lomakkeiden komponenttivalikoimaan, mutta niiden suunnittelussa on lähtökohtaisesti vaikeampaa tehdä perustavanlaatuisia virheitä [Jarrett *et al.*, 2008]. Wroblewskin [2008] määritelmässä erilaiset syötetavat ovat samalla tasolla, käyttökontekstin määrittäessä parhaan vaihtoehdon (kuva 1)

The image shows a sample form with the following elements:

- Text Box:** A single-line text input field labeled "First name".
- Radio Buttons:** Two radio buttons labeled "Male" and "Female" under the heading "Gender".
- Drop-down Menu:** A dropdown menu labeled "Country" with "United States" selected.
- List Box:** A list box labeled "Interests" containing the items "Form Design", "Jazz Guitar", "Mountain Biking", and "Water Polo".
- Checkbox:** A checkbox labeled "Include me in your survey."
- Button:** A rounded button labeled "Submit".

Kuva 1. Lomakkeen erilaisia syötteenantovaihtoehtoja. [Wroblewski, 2008]

Wroblewski kuvailee lomakkeen perusluonnetta mahdollistavana elementtinä. Käyttäjillä on eri käyttökonteksteissa erilaisia tarpeita, joita ratkaisemaan on suunniteltu lomakkeita. Selkeimpinä lomake-esimerkkeinä mainittakoon rekisteröitymis- ja ostovahvistuslomakkeet, joissa molemmissa käyttäjät syöttävät järjestelmään yksityisiä tietojaan. Käyttäjän liiallinen vaivannäkö ja tilitietojen unohtuminen ovat esimerkkejä näiden lomakkeiden kriittisistä ongelmista, mutta myös käyttäjän pelko tietojensa päätymisestä väärin käsiin voi johtaa hänen poistumiseensa palvelusta. Käyttäjältä saatava informaatio on arvokasta saajalle, joten hienotunteisuus, kohteliaisuus ja turvallisuudentunteen luominen maksavat suunnittelunsa hinnan pian takaisin käyttäjätyytyväisyyden kautta.

Lomakkeiden ubiikkiutta saattaa olla vaikea hahmottaa ilman konkreettisia esimerkkejä. Sosiaalisen median sisältöjen luominen tapahtuu lähes yksinomaan lomakkeiden kautta sekä erilaiset verkkosivujen hakutoiminnot ja hakukoneiden toimintamekaniikka lähtevät liikkeelle lomakkeen täyttämisestä. Esimerkiksi Google onkin pyrkinyt pitämään ydintoimintansa lomakkeen äärimmäisen pelkistettynä ja tehokkaana haun välineenä.

Koska lomake on pakollinen askel toiminnon suorittamiseksi, yksi sen tärkeimmistä ominaisuuksista on tehokkuuden korostaminen. Käyttäjät täyttävät lomakkeita pakosta, joten lähtökohtaisesti lomake on sitä onnistuneempi, mitä tehokkaammin käyttäjä pystyy hyödyntämään sitä työkaluna.

3.2 Lomakkeen peruskomponentit

Yksinkertaisimmillaan lomakkeen rakenne muodostuu määrittelevästä osasta eli nimiöstä (label), tekstinsyöttökentästä tai jostakin valintamahdollisuudesta sekä lomakkeen tietojen välittämisen mahdollistavasta painikkeesta. Äärimmäisenä esimerkkinä voidaan käyttää Googlea, jonka etusivulla on maailman luultavasti käytetyin verkkosivun sisäinen lomake. Lomakkeesta on jätetty nimiö kokonaan pois sillä oletuksella, että käyttäjät tietävät universaalisti tekstinsyöttökentän käyttötarkoituksen. Normaalisti jonkin perusosan poisjättäminen tuottaa suuria ongelmia.

3.2.1 Nimiö

Nimiön tarkoituksena on kertoa käyttäjälle tekstinsyöttökentän tai valintamahdollisuuden tarkoituksenmukainen sisältö. Sen sisällön tulee olla tarpeeksi selkeä, jotta voidaan olla varma siitä, että käyttäjä ymmärtää millaista syötettä häneltä odotetaan, mutta toisaalta mahdollisimman lyhyt kognitiivisen kuorman vähentämiseksi.

Penzo [2006] tarkasteli nimiöiden kirjoitusasua sekä sijoittelua tekstinsyöttökenttään nähden riippuen käyttäjältä odotetun syötteen monimutkaisuudesta. Tutkimuksessa testattiin sekä aloittelevia että ammattilaistason käyttäjiä eristetyssä lomakeympäristössä, eli käyttäjillä ei ollut kontekstisidonnaisuutta testiä suorittaessaan. Käyttäjiä arvioitiin silmänliikkeiden määrän ja siirtymien keston perusteella kunkin testiympäristön kognitiivisen kuormittavuuden selvittämiseksi.

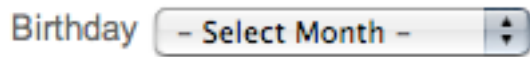
Penzo johti tutkimustuloksista ohjeiston, jonka avulla aivojen kognitiivinen kuorma voidaan minimoida lomakkeen nimiöiden sijoittelun ja tyylyttelyn kautta:

- Nimiön sijoittaminen tekstinsyöttökentän yläpuolelle on paras ratkaisu useimmissa tapauksissa käyttäjien pystyessä käsittelemään nimiön ja tekstinsyöttökentän siirtämättä katsettaan. Tekstinsyöttökentän ja seuraavan nimiön ero on näin toimiessa kuitenkin tehtävä huolellisesti selväksi.
- Jos nimiön sijoittaa esimerkiksi pystysuuntaisen tilanpuutteen vuoksi tekstinsyöttökentän vasemmalle puolelle, tulee nimiön teksti tasata oikeaan reunaan.
- Tavallista tekstiä on helpompi lukea kuin lihavoitua. Jos lihavoitua tekstiä päättyy kuitenkin käyttämään, tulee tekstinsyöttökentän rajoista tehdä mahdollisimman kevyet.
- Pudotusvalikot kiinnittävät käyttäjän huomion voimakkaasti, joten niitä tulee käyttää harkiten ja mielellään tärkeän tiedon keräämiseen. Jos pудо-

tusvalikkoa käyttää vähemmän tärkeän tiedon keräämiseen, tulee se sijoittaa tärkeämpää tietoa sisältävien kohtien jälkeen.

- Pudotusvalikolle ei tule luoda omaa nimiötä, vaan nimiö tulee sijoittaa oletusarvoksi pudotusvalikkoon sen ensimmäiseksi kohteeksi.

Pudotusvalikon sisäinen nimiö tulee kuitenkin erottaa varsinaisista vaihtoehtoista selkeästi esimerkiksi erilaisen muotoilun avulla (kuva 2).



Kuva 2. Esimerkki nimiön erottamisesta varsinaisista vaihtoehtoista muotoilun, kuten ylimääräisten väliviivojen, avulla. [Wroblewski, 2008]

Wroblewskin ehdotus nimiön sijoittamiseen on puolestaan monimutkaisempi. Hänen mukaansa nopein, tekstinsyöttökentän yläpuolinen sijoitusvaihtoehto, ei ole aina paras vaihtoehto, jos käyttäjää haluaa hidastaa tarkoituksella vastauksen miettimisen painottamiseksi. Hän lisää kuitenkin monikielisyystuen uutena ominaisuutena tekstinsyöttökentän yläpuolisen sijoittamisen etuihin, sillä se antaa eniten vaakasuuntaista tilaa nimiön mahdollistamiseksi suunniteltuun tilaan kaikilla kielillä.

3.2.2 Syötekenttä

Syötekentällä tarkoitetaan vastaustapaa nimiön määrittämään tietoon ja se on useimmiten kuvan 1 mukaisesti joko tekstinsyöttökenttä (text field), radiopainike (radio button), pudotusvalikko (drop-down menu), luetteloruutu (list box) tai valintalaatikko (checkbox). Kullakin syötetapavaihtoehdolla on omat hyvät sekä huonot puolensa ja Wroblewski [2008] toteaaakin parhaan tavan valinnan olevan joka kerta uniikki ja subjektiivinen riippuen käyttäjäkannasta ja lomakkeen suunnittelijoista. Syötetavan valintaa tehdessä lomakesuunnittelijan tulee olla tietoinen siitä, miten syötetavat eroavat toisistaan tehokkuudessa, selkeydessä ja virheiden estämisessä.

3.2.3 Painikkeet

Lomakkeen tärkein painike on aina toiminnon varmistava, ensisijaisen toiminnon (primary action) painike, jonka avulla käyttäjä pystyy vahvistamaan saavuttaneensa tavoitteensa saamalla lomakkeen valmiiksi. Vastapainona käyttäjälle tarjotaan yleensä toissijaisen toiminnon painiketta, jonka toiminta on pääosin täysin vastakkainen ensisijaisen toiminnon kanssa. Wroblewski [2008] kuitenkin varoittaa radikaalien muutosten painikkeiden aiheuttavan mahdollisesti negatiivisia johdannaisvaikutuksia varsinkin vahingossa painettaessa. Esimerkkinä hän käyttää lomakkeen tyhjennyspainiketta, jota vahingossa painamalla

käyttäjä hukkaa vaivalla syöttämänsä tiedot. Toissijaisiksi toiminnoiksi hän ehdottaakin positiivisten toiminnollisuuksien painikkeita, kuten esikatselua, tallennusta ja viemistä (export). Lisäksi toissijaisen toiminnon ulkoasun tulisi olla vaatimattomampi kuin eteenpäin vievän, ensisijaisen toiminnon. Kun toissijaisten toimintojen visuaalista houkuttelevuutta vähentää, virhealttius vähenee ja samalla käyttäjää ohjataan kohti onnistumiskokemusta. Esimerkiksi usealle sivulle jaetun lomakkeen eteenpäin-painikkeen ulkoasua tulee korostaa taaksepäin-painikkeeseen nähden käyttäjän ohjaamiseksi kohti päätepestettä.

3.3 Lomakkeen tukiominaisuudet

Lomakkeisiin lisätään usein peruskomponenttien lisäksi erilaisia ulkoisia tai tyylikeinollisia tukitoimintoja käyttäjän ohjaamiseksi oikeelliseen toimintaan. Tämänkaltaiset tukiominaisuudet voi tunnistaa samankaltaisiksi käytettävyyss-tutkimuksessa käytettyjen, Normanin [2013] lanseeraamien termien signifier ja affordance kanssa.

3.3.1 Avustaminen komponentteja manipuloimalla

Komponenttien ulkoasua muokkaamalla on mahdollista antaa käyttäjälle etukäteen vihjeitä siitä, millaisessa muodossa syöte tulisi antaa.

Tekstinsyöttökentän pituuden asettaminen määramittaan auttaa käyttäjää hahmottamaan syöteen merkkimäärän ja mahdollisesti toivotun muotoilun. Esimerkiksi postinumerolle varattu tekstinsyöttökenttä voidaan lyhentää viiden merkin mittaiseksi tai puhelinnumeron vastaanottava kenttä voidaan pilkkoa osiin, jolloin käyttäjä saa vihjeen suuntanumeron muodosta. Pituutta manipuloitaessa on varmistettava, että käyttäjällä on mahdollisuus mahduttaa oikeaksi kokemansa vastaus varattuun tilaan, jos vastauksen pituus ei ole varmasti määrittäminen. Toisaalta liian pitkä tekstinsyöttökenttä saattaa hämmentää käyttäjää ja tämä voi kyseenalaistaa vastauksensa oikeellisuuden sen vaikuttaessa liian lyhyeltä.

Vihjeteksti (hint text) on nimensä mukaisesti tekstinsyöttökentässä oletuksena näkyvä vihje siitä, millainen syöte käyttäjän tulisi antaa. Vihjeteksti on alun perin viime vuosituhanella suunniteltu paikanpitäjäksi verkkosovelluksiin esteettömyysnäkökulmasta, jotta kaikki selaimet osaisivat käsitellä tekstinsyöttökenttiä oikein. Osalla selaimista oli vielä tuolloin ongelmia tyhjien kenttien kanssa [W3C, 1999]. Vihjetekstien käyttöä ei enää nykyään suositella, sillä se lisää käyttäjän kognitiivista kuormaa, eikä sitä tarvita nykyisellä laitekannalla esteettömyysnäkökulmastakaan. Jarrett [2010] kuvaa käyttäjien käyttäytymistä tekstinsyöttökentän osalta seuraavasti: Käyttäjän nähdessä tyhjän tekstinsyöttökentän hän kirjoittaa siihen, jonka jälkeen kenttä näyttää täytetyltä. Tästä

käyttäjät oppivat, että täyttämistä vaativat kentät ovat tyhjiä ja tekstiä sisältävät kentät ovat puolestaan jo täytettyjä. Vihjetekstistä voi tehdä varsinaisesta täytöstä erottuvamman vaihtamalla sen väriä esimerkiksi harmaaseen, mutta se ei kuitenkaan ratkaise koko ongelmaa. Se ei myöskään poista toista ongelmaa vihjetekstin katoamisesta silloin, kun kenttä aktivoidaan tai siihen aletaan kirjoittaa. Jos käyttäjä ei tällaisessa tilanteessa osaa tulkita nimiötä oikein, joutuu hän pahimmassa tapauksessa pyyhkimään koko kirjoittamansa tekstisisällön nähdäkseen vihjeen. Nykyisin vihjetekstimaininta on poistettu verkkomateriaalin esteettömyysoppaasta [W3C, 2008].

Älykkäät vakiot (smart defaults) ovat esitäytettyjä valintoja lomakkeella esitettäviin kysymyksiin. Älykkäiden vakioden tarkoituksena on palvella mahdollisimman suurta ihmisjoukkoa joko hankalasti ymmärrettävissä tai vastaavasti todella helpoissa kysymyksissä. Nielsen [2005] kuvailee esimerkin omasta konferenssi-ilmoittautumislomakkeestaan, jossa osallistujan kotimaa päätellään tämän IP-osoitteen perusteella. Luonnollisesti osa ihmisistä joutuu vaihtamaan tiedon oikeaksi itse, mutta sama työ säästyy suurimmalta osalta osallistujia, kun taas ilman älykästä vakiota kaikki joutuisivat vaihtamaan kotimaan oikeaksi.

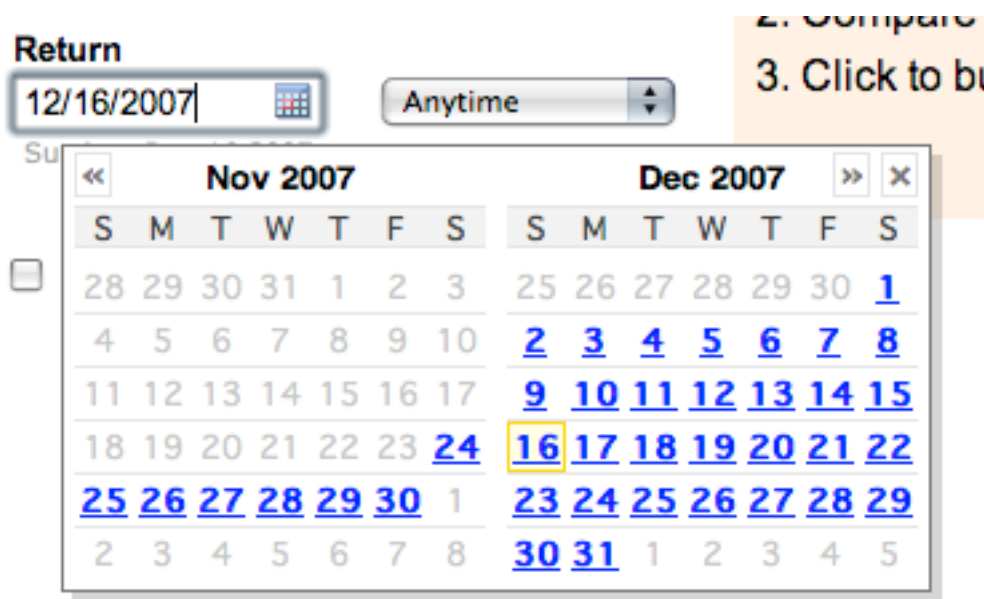
3.3.2 Peruskomponenttien ulkopuoliset tukitoiminnot

Peruskomponenttien ulkopuolisilla tukitoiminnoilla tarkoitetaan ominaisuuksia, jotka tukevat lomakkeen täyttämistä, mutta jotka eivät ole suoraan yhteydessä lomakkeen peruskomponentteihin. Toisin sanoen lomaketta tulee pystyä käyttämään myös ilman ulkopuolisia tukitoimintoja.

Lomakkeet sisältävät hyvin usein kahdenlaisia kenttiä: pakollisia ja vaihtoehtoisia. Pakollisten kenttien täyttämättä jättäminen estää käyttäjää saavuttamasta tavoitettaan, eli siirtymästä seuraavaan vaiheeseen. Tästä syystä on äärimmäisen tärkeää, että käyttäjä tietää, mitkä tiedot lomakkeesta tulee olla täytettynä. Wroblewskin [2008] mukaan tekstin käyttäminen pakollisten kenttien indikoimiseen on paras vaihtoehto, mutta myös asteriski (*) ymmärretään pakollisen kentän indikaattorina lähestulkoon universaalisti. Asteriskia käytettäessä tulee silti muistaa selittää sen tarkoitus hyvien käytettävyysskäytänteiden mukaisesti. Vapaavalintaisten kenttien käyttämistä lomakkeissa tulee välttää, sillä jos tieto ei ole välttämätöntä, ajavat käyttäjän negatiiviset tuntemukset kuten ylimääräinen kognitiivinen kuormitus ja lomakkeen täyttämisen hidastuminen pian tiedosta saatavan hyödyn edelle. Jos lomakkeella on kuitenkin myös vaihtoehtoisia kenttiä, voidaan nyrkkisääntönä merkitsemiselle pitää sen merkitsemistä, kumpaa on vähemmän ylimääräisen informaation minimoimiseksi.

Sisäisten lisäyksien (inline additions) avulla käyttäjä voi kopioida lomakkeelle uuden kentän tilanteessa, jossa hänen täytyy kirjata useampia samankaltaisia kenttiä kuten usean tiedoston lataamisessa palvelimelle. Sisäisten lisäyksien avulla ylimääräiset kentät saadaan piilotettua käyttäjiltä jotka eivät niitä tarvitse, mutta samalla ne ovat helposti niitä tarvitsevien käyttäjien ulottuvilla.

Päälle aukeavat kentät (overlays) mahdollistavat laajalle alueelle levittyvän informaation näyttämisen vain silloin, kun siitä on hyötyä. Yleinen esimerkki päälle aukeavasta kentästä on päivämäärän valinta kalenterin avulla, jolloin numeroiden kirjoittamisen sijaan käyttäjän on mahdollista valita graafisesta kalenterista päivä huolehtimatta esimerkiksi päivämäärän oikeanlaisesta muotoilusta (kuva 3). Päälle aukeavia kenttiä käytettäessä on hyvän käytännön mukaista indikoida aukeava tapahtuma siten, ettei tilanne tule käyttäjälle täytenä yllätyksenä. Toisaalta täytyy huolehtia siitä, että käyttäjä pystyy antamaan syötteensä yhä myös kirjoittamalla, eikä päälle aukeava kenttä saa peittää alkupeleistä vuorovaikutuskanavaa.



Kuva 3. Kalenterikenttä aukeaa sivun päälle näyttäen kahden kuukauden päivämäärät. [Wroblewski, 2008]

4. Käytettävyys ja lomakesuunnittelu

Tässä luvussa käsitellään edellä tutkittuja lomakesuunnittelun suuntaviivoja käytettävyystutkimuksen näkökulmasta. Tarkoituksena on löytää yhtäläisyyksiä ja toisaalta eroavaisuuksia perinteisen käytettävyystutkimuksen ja lomakesuunnittelun välillä. Lopulta lomakesuunnittelukin on vain käytettävyyden kehittämistä tavoitteena lomakkeen käytön helppouden maksimoiminen.

4.1 Käyttäjien asenteet

”Lomakkeet haisevat. Jos et usko minua, koita löytää joku joka pitää niiden täyttämistä”, Wroblewski [2008]. Lomakesuunnittelussa ei lähtökohtaisesti tähdätä hyvän käytettävyyden ominaisuuksien parantamiseen (positive usability), vaan ennemminkin käytettävyyssongelmien vähentämiseen (non-negative usability). Vaikka molemmilla Kurosun [2007] selittämillä termeillä on sama käytettävyyttä kehittävä tarkoitus, on lomakkeen täyttäminen käyttäjälle välttämätön askel jonkin tehtävän suorittamiseksi, eikä siitä saa yleensä kukaan erityisemmin nautintoa. Jarrett ja muut [2008] toteavat lisäksi käyttäjien tulleen hiljalleen vaativammiksi lomakkeiden laatukriteerien suhteen, mikä alleviivaa lomakesuunnittelun tärkeyttä.

4.2 Lomake tilanteen mukaan

Lomakesuunnittelu on samalla lailla kontekstisidonnaista kuin käytettävyyssuunnittelukin. Lomakesuunnittelussa sekä lomakesuunnittelun-, että käytettävyyssuunnittelun suuntaviivat pitävät paikkansa, mutta niitä täytyy soveltaa jokaiseen tilanteeseen tapauskohtaisesti. Myös ulkopuolisten muuttujien osuus täytyy ottaa henkilökohtaisia tietoja käsitellessä huomioon. Ihmisten tietojen keräämistä, säilyttämistä ja siirtämistä säädellään laeilla, joiden mukaan täytyy toimia. Erityisen tarkkaa henkilötietojen käsittely on lasten osalta, nyansseista tulee ottaa selvää ennen kuin edellä mainitun kaltaisia tietoja alkaa keräämään. Lakikysymysten ulkopuolelta käyttäjädemografia sanelee pitkälti lomakkeeseen parhaiten sopivat komponentit ja tyylin. Lisäksi laitekehitys sanelee omat ehtonsa erilaisten ratkaisujen toimivuudelle. PDA-laitteiden takia kummittelemaan jäänyt vihjeteksti ei ole tarpeellinen tämän päivän kosketusnäytöissä. Sen sijaan uudet vuorovaikutustekniikat vaativat uudelleensuunniteltuja lomakkeen käyttötapoja.

4.3 Yhteydet elävään elämään

Digitaalisen materiaalin käytettävyyssuunnittelun kulmakiviin kuuluu analogiat elävän elämän kanssa. Liiallinen samankaltaisuus perinteisten paperisten lomakkeiden kanssa ei ole hyvästä, sillä sellaisenaan sähköiseksi siirretty paperinen lomake ei hyödynnä lainkaan tietoteknisiä mahdollisuuksia.

Suuremmassa mittakaavassa tarkasteltuna ja käyttökokemuksen kautta ajateltuna sähköinen ennakko- ja jälkimarkkinointi esimerkiksi verkkokaupassa luovat myös edellytyksiä ja odotuksia lomakkeelle samalla tavoin kuin elävän elämän kaupassa. Käyttäjä kerää haluamansa tuotteet ostoskärryyn tai -koriin värikkäiden pakkausten ja mainosten houkuttelemina. Ennakkomarkkinointi onkin yleensä paremmin suunniteltu ja toteutettu kuin se, mitä tapahtuu ostos-

ten tekemisen ja oston vahvistuslomakkeen täyttämisen jälkeen. Syynä tähän lienee onnistumisen välitön seuraus kassavirtana, mutta pitkällä aikavälillä oston jälkeiset kokemukset ovat myös tärkeitä asiakastyytyväisyyden ja -uskollisuuden luomisessa. Kivijalkaliikkeessä asioidessaan asiakas saa usein fyysisen tuotteen mukaansa kassan tarjoaman hymyn saattamana. Verkko-ostoksia tehtäessä mitään fyysistä ei saa itselleen välittömästi ja ainoana yhtäläisyytenä kivijalkaliikkeessä asiointiin saattaa olla sähköinen kuitti.

4.4 Lomakkeiden käytettävyystudkimus

Lomakkeiden käytettävyydessä pätevät samat lainalaisuudet kuin muussakin käytettävyystudkimuksessa. Käytön tehokkuus, virheiden minimointi ja yleinen miellyttävyys ovat avainasemassa. Wroblewski [2008] listaa kuusi menetelmää, joiden avulla hänen tutkimusryhmänsä arvioi EBay-verkkokauppapaikan lomakkeiden käytettävyyttä:

1. Käytettävyystudkimus: Laboratorio-olosuhteissa tapahtuva käyttäjien vuorovaikutuksen seurannan avulla on mahdollista saada arvokasta laadullista ja määrällistä tietoa. Menetelmän avulla on myös mahdollista rajata palaute hyvinkin tiiviille alueelle.
2. Kenttätutkimus: Seuraamalla käyttäjiä luonnollisessa käyttöympäristössä tuottaa käytettävyystudkimusta aidompaa tietoa, mutta laatu ja määrä voi olla paljonkin heikompaa.
3. Käyttäjätuki: Käyttäjien raportoimat ongelmat auttavat usein löytämään ongelman ytimen ja käyttäjien kanssa kommunikointi voi myös tuottaa loogisen ratkaisun ongelmaan.
4. Sivuston seuranta: Lomakkeen sisältävän verkkosivun mittareita seuraamalla on mahdollista tutkia useita käytettävyydaspekteja, kuten onnistumisprosenttia, mitä komponentteja käytettiin ja missä järjestyksessä sekä millaista tietoa lomakkeelle syötettiin.
5. Silmänliiketutkimus: Lomakkeen täytön aikaisia silmänliikkeitä seuraamalla on mahdollista jäljittää katseen kiinnittävien kohtien lukumäärä ja kunkin katseen kesto aika kognitiivisen kuorman selvittämiseksi.
6. Yleisten tapojen kartoittaminen: Yleisimmin käytettyjen mallien tutkiminen saattaa tuottaa arvokkaita näkemyksiä aiheeseen.

5. Yhteenveto ja pohdintaa

Lomakesuunnittelu on pohjimmiltaan melko epäkiitollista. Onnistunut lomake ei ole käyttäjän tiellä liikaa ja jää täten hyvin vähälle huomiolle. Lomakkeen epäonnistumisella voi olla kauaskantoisia seurauksia ja suunnittelu saa kritiik-

kiä osakseen. Hyvänä esimerkkinä jälkimmäisestä toimii Yhdysvaltain presidentinvaalien äänestyslomake, jonka huonon käytettävyyden on sanottu ratkaisseensa vaalin voiton.

Lomakesuunnittelussa pätevät hyvin pitkälti perinteiset käytettävyysslainalaisuudet, joista johtamalla saatu aikaan toimivia suuntaviivoja. Jo tehdyn tutkimuksen perusteella on helppo todeta usein esiintyvät, helposti korjattavat käytettävyysongelmat lomakkeissa. Wroblewski [2008] toteaa oman työryhmänsä lomakesuunnittelun parantaneen asiakkaiden verkkosivujen tehokkuutta yleensä noin 10–40%. Lomakkeisiin liittyvä ongelma on siis merkittävä ja perusratkaisut helppoja toteuttaa. Silti huonosti toteutettuihin lomakkeisiin törmää hyvin usein. Ehkä talouslukujen esittäminen yhtiöiden päättävälle elimille sysäisi lomakesuunnittelua kullakin taholla eteenpäin. Esimerkiksi Wroblewski [2008] esittelee tapauksen, jossa huonon lomakesuunnittelun on arvioitu maksaneen yhtiölle 300 miljoonaa dollaria käyttäjien lopettaessa ostotapahtuman kesken.

Jatkotutkimusideana näkisin lomakkeiden jaottelemisen useaan eri vaiheeseen. Monipolvisesta lomakesuunnittelusta löytyi muutama sivuhuomautus, mutta tietääkseni aiheesta ei ole tehty kattavaa tutkimusta vaikka asiantuntijafoorumeilla kysymys monipolvisen lomakkeen toimivuudesta vaikuttaa olevan monen ihmisen mielessä.

Viiteluettelo

- [Barber *et al.*, 1998] Wendy Barber and Albert Badre, *Culturability: The merging of culture and usability*. In: *Proc. of the Fourth Conference on Human Factors and the Web*, Basking Ridge, NJ., 1998.
- [Jarrett *et al.*, 2008] Caroline Jarrett and Gerry Gaffney, *Forms That Work: Designing Web Forms for Usability*, Morgan Kaufmann, 2008.
- [Jarrett, 2010] Caroline Jarrett. *Don't put hints inside text boxes in web forms*. Retrieved from <http://www.uxmatters.com/mt/archives/2010/03/dont-put-hints-inside-text-boxes-in-web-forms.php>, Checked October 30, 2014.
- [Kurosu, 2007] Masaako Kurosu. *Concept of usability revisited*, In: *Proc. of HCI'07 Interaction Design and Usability*, 1–8.
- [Nielsen, 2005] Jakob Nielsen, *The Power of Defaults*. Retrieved from <http://www.nngroup.com/articles/the-power-of-defaults/>, Checked October 30, 2014.
- [Nielsen *et al.*, 2006] Jakob Nielsen and Hoa Loranger, *Prioritizing Web Usability*, New Riders, 2006.
- [Norman, 2013] Don Norman, *The Design of Everyday things*, Basic Books, 2013.

- [Penzo, 2006] Matteo Penzo, *Label Palacement in Forms*. Retrieved from <http://www.uxmatters.com/mt/archives/2006/07/label-placement-in-forms.php>, Checked October 30, 2014.
- [W3C, 1999] Web Content Accessibility Guidelines 1.0, <http://www.w3.org/TR/WAI-WEBCONTENT/#gl-own-interface>
- [W3C, 2008] Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0, <http://www.w3.org/TR/WCAG20/>
- [Wroblewski, 2008] Luke Wroblewski, *Web Form Design: Filling in The Blanks*, Rosenfeld, 2008. <http://www.rosenfeldmedia.com/books/webforms/>

Katsaus steganografiaan

Pauliina Kiviranta

Tiivistelmä.

Tämän tutkielman aiheena on steganografia ja tutkielman menetelmänä toimii kirjallisuuskatsaus. Tutkielman kohteena on erityisesti moderni, digitaalisessa ympäristössä sovellettava steganografia. Tutkielmassa perehdytään digitaalisen steganografian teknisiin erityispiirteisiin, sen moderneihin sovellusalueisiin ja siihen, miten steganografia eroaa sukulaistekniikoistaan kryptografiasta ja digitaalisista vesileimoista. Steganografian tekniikan yhteydessä esitellään myös stegoanalyysin pääpiirteet. Tämän jälkeen tutkielmassa esitellään erilaisia tapoja luokitella digitaalista steganografiaa. Työn loppuosassa kerrotaan tarkennetusti tekniikoista, joiden avulla steganografiaa voidaan soveltaa kuva-, teksti- ja äänitiedostoihin sekä verkkoliikenteeseen.

Katsauksen perusteella steganografia on monipuolinen tiedonsalauksen tekniikka, joka voidaan nähdä näkökulmasta riippuen joko tietoturvariskinä tai vartenotettavana mahdollisuutena kryptografisen salauksen rinnalla tai sen täydentäjänä. Toistaiseksi kuvasteganografia on sovelletuin digitaalisen steganografian osa-alue, mutta näyttää siltä, että tulevaisuudessa merkittävää jalansijaa saavat myös verkkosteganografian kaltaiset hienovaraisemmat tekniikat.

Avainsanat ja -sanonnat: Steganografia, tiedonsalaus, kryptografia, digitaaliset vesileimat.

1. Johdanto

Tässä tutkielmassa perehdytään tiedonsalausmenetelmään nimeltä *steganografia*. Tutkielman tarkoituksena on perehtyä kirjallisuuden avulla siihen, miten steganografiaa on tapana toteuttaa yleisellä tasolla esiteltynä ja mitkä ovat aiheeseen liittyvät uusimmat suuntaukset.

Aluksi määrittelen luvussa 2 sen, mitä steganografialla tarkoitetaan. Tämän tutkielman mielenkiinto kohdentuu erityisesti digitaalisessa ympäristössä toteutettavaan steganografiseen salaukseen. Tutkielman kolmannessa luvussa kerrotaan steganografian teknisistä pääpiirteistä. Tekniikan yhteydessä tehdään myös lyhyt katsaus steganografista salausta murtamaan pyrkivään *stegoanalyysiin* ja sellaisiin teknisiin heikkouksiin, jotka saattavat tuottaa ongelmia steganografiaa sovellettaessa. Luvussa 4 perehdytään lyhyesti steganografian lähitekniikoihin *kryptografiaan* sekä *digitaalisiin vesileimoihin* ja määritellään, mikä tekniikoita yhdistää ja erottaa ja miksi niitä ei ole syytä sekoittaa toisiinsa. Lähi-

tekniikoiden jälkeen perehdytään erilaisiin tapoihin luokitella steganografiaa. Merkittäväksi luokitteluksi kohoaa luokittelu mediatyyppin perusteella ja tästä syystä luvussa 5 kerrotaan myös tarkemmin steganografian sovelluksista eri mediatyyppejä edustavissa tietosisällöissä. Tähän tutkielmaan valikoitui mediatyypeistä kuva-, teksti- ja äänitiedostot sekä steganografian tuorein sovelusala verkkosteganografia. Lopuksi luvussa 6 pohditaan lyhyesti tutkielman sisältöä ja tuloksia.

2. Steganografia – lyhyt määrittely

Steganografia on tiedonsalausmenetelmä, jolla on pitkä historia ja jota hyödynnetään myös digitaalisena aikana runsaasti. Cox ja muut [2008] määrittelevät steganografian lyhyesti sanoilla *art of concealed communication*. Coxin ja muiden määritelmän voisi yksinkertaisesti kääntää esimerkiksi *piilotetun kommunikaation taidoksi* tai *taiteeksi*. Sana *steganografia* on johdos kreikan kielestä, jossa sana *steganos* tarkoittaa peitettyä tai piilotettua ja sana *graphein* on verbi kirjoittamiselle. Sanan *steganografia* voidaan siis sanoa tarkoittavan ”peitettyä kirjoitusta” tai ”piilotettua kirjoitusta”. Nimitys on jossakin määrin analoginen merkittävän sukulaistekniikan *kryptografian* nimityksen kanssa, joka merkitsee vapaasti käännettynä ”salaista kirjoitusta”. Sekä steganografisten että kryptografisten tekniikoiden soveltamisen juuret juontuvat antiikin aikoihin asti: kumpikaan näistä edelleen pätevistä tiedonsalausmenetelmistä ei suinkaan ole uusi keksintö. [Zielinska et al., 2014; Ashok et al., 2010; Cox et al., 2008]

Steganografista tiedonsalausta on mahdollista toteuttaa niin digitaalisessa ympäristössä kuin sen ulkopuolellakin. Steganografian avulla salattavaksi tarkoitettu viesti piilotetaan niin, että vain viestin olemassaolosta tietoiset henkilöt voivat sen löytää. Mahdollisimman yksinkertaisena esimerkkinä steganografiasta salauksesta voisi toimia vaikkapa näkymättömän musteen käyttö [Cox et al., 2008]. Huolimatta siitä, sovelletaanko steganografiaa perinteisessä vai digitaalisessa ympäristössä, sen tekninen peruseriaate on aina sama. Steganografia voidaan luokitella digitaalisten teknologioiden hyödyntämisen tai hyödyntämättömyyden perusteella historialliseen ja moderniin steganografiaan. Digitaalista steganografiaa on sovellettu 1970-luvulta lähtien, mutta vasta viime vuosikymmenet ovat tehneet siitä valtavirtatekniikkaa. Tämän tutkielman mielenkiinto kohdistuu erityisesti moderniin, digitaalisessa ympäristössä toteutettavaan steganografiaan. [Zielinska et al., 2014; Ashok et al., 2010]

Steganografiaa voidaan soveltaa käytännössä monenlaisiin tarkoituksiin. Toisaalta steganografian avulla toteutettua tiedonsalausta voidaan hyödyntää täysin laillisissa tarkoituksissa. Tällaisia laillisia tarkoituksia ovat esimerkiksi digitaalisten vesileimojen tai muiden hyödyllisten tietosisältöjen lisääminen

mediatiedostoihin sekä osa steganografian avulla toteutetusta piilossa tapahtuvasta kommunikaatiosta eri osapuolten välillä [Wang & Wang, 2004]. Steganografian avulla voidaan myös lisätä piilotettua metadataa tietosisältöihin. Wang ja Wang listaavat erääksi lailliseksi steganografian sovellukseksi myös esimerkiksi useiden mediatiedostojen integroinnin yhteen kantajaan käytännöllisen ja luotettavan tiedon varastoinnin (data storage) takaamiseksi. Tämä voisi toimia käytännöllisenä vaihtoehtona tiedon pakkaamiselle.

Steganografiaa hyödynnetään kasvavissa määrin myös rikollisten tavoitteiden edistämiseen, kuten virusten ja vakoiluohjelmien levittämisen välineenä. Steganografian rikollista käyttöä on syytä tarkastella merkittävänä nykypäivän tietoturvakysymyksenä, vaikka kryptografia nouseekin vielä toisinaan arkipuheessa ja tutkimuksessa steganografiaa merkittävämmäksi tiedonsalauksen välineeksi. Stegoanalyysin tekniikoiden kehittämisen ja tutkimuksen avulla pyritään vastaamaan steganografian väärinkäytön aiheuttamiin tietoturvaongelmiin. Hyviä esimerkkejä steganografiaa hyödyntäneistä tietokoneviruksista ovat kesäkuussa 2010 löydetty Stuxnet-mato sekä syyskuussa 2011 löydetty Duqu-mato. Madoista jälkimmäisenä mainittu oli suunniteltu erityisesti keräämään ja sen jälkeen kuljettamaan eteenpäin informaatiota saastuneesta tietojärjestelmästä. Steganografiaa sovellettiin Duqun yhteydessä ainakin kaapatun tiedon salaamisessa niin, että saastuneesta tietojärjestelmästä ulospäin tapahtunut tiedonsiirto peitettiin steganografisin keinoin epäilysten heräämisen estämiseksi. Steganografiaa on sovellettu päivänvaloa kestävämpiin tarkoituksiin myös tietovuotojen peittämisen yhteydessä. [Zielinska et al., 2014] On toki syytä huomata, että tietovuotojen rikollisuus on eräs tämän päivän suurista, monitoroitavista moraalikysymyksistä, joita tietoyhteiskunta on tuonut tullessaan. Tietovuotoja ei ole välttämättä mahdollista kategorioida mustavalkoisesti rikolliseksi tai ei-rikolliseksi toiminnaksi vaan se riippuu paljolti katsojan näkökulmasta.

3. Steganografian tekniikka

Peruseriaate steganografian takana on seuraavanlainen: tieto, jonka tekniikan hyödyntäjä haluaa salata, piilotetaan johonkin kantajaan, joka on jo valmiiksi merkityksellinen, eikä siis täten varta vasten tiedonpiilotustarkoitusta varten luotu. Merkityksellinen kantaja voi olla esimerkiksi kuva tai pätkä tekstiä. Kantajan sisällöllä ei useimmiten ole mitään tekemistä salatun viestisisällön kanssa ja salattava viestisisältö on kantajana toimivaa mediasisältöä merkittävämpi steganogrammin osa. *Steganogrammilla* tarkoitetaan tietosisältöä, johon on lisätty steganografian avulla salattua dataa. Modernia digitaalista steganografiaa sovellettaessa kantajana toimii useimmiten jokin digitaalisen median tuote,

esimerkiksi kuva tai äänitiedosto, mutta salausta voidaan upottaa myös esimerkiksi tiedonsiirtosignaaliin. Steganografisen salauksen toimivuudesta kertoo se, kuinka paljon lisätty viesti muokkaa kantajana toimivaa tiedostoa: esimerkiksi kuvatiedostoon lisätyn viestin tulisi perustua niin pieniin muutoksiin kuvan alkuperäisessä informaatiossa, ettei muutoksia voi paljaalla silmällä havaita. Sama periaate pätee historiallisiin steganografian sovellutuksiin: kantajaan piilotetun viestin salaaminen on tapahtunut onnistuneesti, jos kukaan viestistä tietämätön ei viestin olemassaoloa havaitse. [Cheddad et al., 2010; Cox et al., 2008; Singh & Singh, 2013; Zielinska et al., 2014; Wang & Wang, 2004]

Voidaan sanoa, että edellä mainittujen ehtojen perusteella steganografista salausta voisi olla mahdollista lisätä digitaalisiin tuotteisiin myös perinteisillä metodeilla, kuten piirtämällä lisäsisältöä kuvaan tai sopimalla tekstitiedoston rakenteen merkityksestä toisen osapuolen kanssa niin, että viesti olisi tulkittavissa paljaalla silmällä katsomalla silloin kun katsoja osaa sitä etsiä. Tietojenkäsittelytieteen näkökulmasta on kuitenkin luonnollisesti mielenkiintoisempaa tarkastella lähinnä sellaisia steganografian tekniikoita, joilla tiedonsalausta voidaan tehostaa sopivia algoritmeja ja täten tietokoneiden laskentatehoa hyödyntämällä. Tästä syystä tässä tutkielmassa perehdytäänkin lähinnä sellaisiin salauksen tekniikoihin, jotka edellyttävät tietokoneita vaativaa tietojenkäsittelyä ollakseen toteuttamiskelpoisia. Yleensä digitaalista steganografiaa sovellettaessa steganogrammin luova osapuoli upottaa salattavan viestin kantajaan jonkin sopivan algoritmin avulla ja vastaanottajalla on käytössään ulkopuolisilta salattu *stegoavain* (stego-key), jonka avulla piilotetun viestin voi purkaa kantajasta. Verkkosteganografian yhteydessä myös sellaiset salauksen ja purkamisen toteutukset, joissa erillistä avainta ei ole ja tiedon purku tapahtuu pelkästään tiedonpiilotusmetodin tuntemuksen pohjalta, ovat mahdollisia [Mazurczyk, 2013].

Ashok ja muut [2010] mainitsevat kolme laajempaa steganografian teknistä toteuttamisperiaatetta, jotka eivät ole riippuvaisia kantajana toimivan tiedoston mediatyypistä. Nämä periaatteet ovat *injektio*, *korvaaminen* sekä *uuden tiedoston luonti*. Injektioilla (injection) tarkoitetaan tekniikkaa, jossa salattu informaatio upotetaan jo valmiiksi olemassaolevaan mediatiedostoon. Korvaamisella (substitution) tarkoitetaan tekniikkaa, jota hyödynnettäessä osa alkuperäisen tiedoston datasta korvataan sellaisella samaisen datan muokatulla versiolla, joka sisältää koodauksellisen merkityksen. Esimerkiksi kuvatiedoston pikselien kahdeksasta bitistä koostuvaan väriarvoon tehdyt hienovaraiset, merkitykselliset muutokset ovat korvaamistekniikan avulla lisättyä salattua dataa. Uuden tiedoston luonnissa (generation of a new file) on puolestaan kyse siitä, että luodaan jokin jo valmiiksi salattua informaatiota sisältävä tiedosto niin, ettei salatua sisältöä kuitenkaan voida havaita päällisin puolin tarkastelemalla. Vaikka

uuden tiedoston luonti poistaa mahdollisuuden verrata kantajaa alkuperäiseen, koskemattomaan mediatiedostoon, on kuitenkin osittain kyseenalaista luokitella tämä tekniikka steganografiaksi. Uuden tiedoston luonti ei täytä kaikin puolin steganografian määritelmää, sillä siinä tietoa ei lisätä jo valmiiksi merkitykselliseen kantajaan. [Ashok et al., 2010]

Luvussa 4 kerrotaan vielä tarkemmin steganografiasta sovellettuna eri mediatyyppeihin. Jokaiselle tähän työhön valikoituneelle mediatyypille omistettussa osassa kerrotaan tarkemmin kyseistä mediatyyppiä edustavissa kantajissa toteutettujen steganografisten tekniikoiden erityispiirteistä ja tuoreista sovelluksista. Seuraavaksi perehdytään lyhyesti stegoanalyysin pääpiirteisiin sekä teknisiin haasteisiin, joita steganografiaa sovellettaessa nousee esille.

3.1. Stegoanalyysi

Stegoanalyysillä tarkoitetaan tekniikoita, joita käyttämällä pyritään havaitsemaan steganografian avulla upotettuja tietosisältöjä. Mahdollisuuksien salliessa stegoanalyysin avulla pyritään myös arvioimaan upotettujen sisältöjen kokoa ja toisinaan jopa purkamaan upotettuja tietosisältöjä luettavaan muotoon. Lyhyesti sanottuna stegoanalyysin keinot ovat vastatoimenpiteitä steganografista tiedonsalausta vastaan. Helpoin tapa suorittaa stegoanalyysiä olisi verrata alkuperäistä piilotettua signaalia mahdollisiin piilotetun signaalin kantajiin, mutta koska alkuperäisiä piilotettuja sisältöjä on stegoanalyytikoille harvoin tarjolla, stegoanalyysin suorittaminen vaatii monimutkaisempia lähestymistapoja. [Geetha et al., 2009]

Stegoanalyysiä tehdään useimmin *sokeasti* (blind steganalysis) [Geetha et al., 2009]. *Sokealla stegoanalyysillä* tarkoitetaan mahdollista salausta sisältävien tietosisältöjen analysointia niin, että alkuperäistä piilotettua sisältöä ei ole saatavilla eikä alkuperäistä salausalgoritmia ole käytettävissä analyysin avuksi. Sokea stegoanalyysi on ehdottomasti yleisin stegoanalyysin muoto, mutta esimerkiksi Cox ja muut [2008] mainitsevat myös *kohdennetun stegoanalyysin* (targeted steganalysis), jota hyödynnettäessä voidaan olla sokeaa tekniikkaa spesifisempiä stegoanalyyttisten työkalujen valinnassa. Stegoanalyyttisen algoritmin suorituskykyä voidaan mitata *löydöksen määrän* (detection rate), *onnistumistodennäköisyyden* (probability of correct identification) ja *virheellisten löydösten määrän* (error rate) perusteella. [Geetha et al., 2009]

Visuaalisen analyysin eli kuvatiedostoihin mahdollisen piilotetun sisällön lisäämisen yhteydessä ilmaantuneiden ulkoisten muutosten tarkastelun lisäksi tilastollinen analyysi on merkittävä stegoanalyysin keino. Visuaalista analyysiä voidaan toteuttaa paljaalla silmällä tai tietokoneavusteisesti niin, että analyysin kohteena oleva kuva puretaan *bittialueisiin* (bit plane). Visuaalinen analyysi toimii parhaiten erityisesti silloin, kun salattu data on lisätty mahdollisimman

tasaisille bittialueille. [Wang & Wang, 2004] Koska kuvat ovat ehdottomasti tutkituin steganografian kantajatyyppejä, muihin medioihin kohdennettavista, visuaalisen analyysin tapaisista stegoanalyytisistä lähestymistavoista ei löydy tätä tutkielmaa varten tekemäni katsauksen perusteella mainintoja. Voidaan kuitenkin olettaa, että myös esimerkiksi tekstiin, ääneen ja videotiedostoihin tehtyjä muutoksia voidaan tarkkailla muidenkin kuin tilastollisen analyysin keinojen avulla.

Tilastollisen stegoanalyysin pohjana on se ennako-oletus, että salattua tietoa upotettaessa tarkoituksena on luoda tietosisältö, joka on havaitsemiskyvyn rajoissa identtinen alkuperäisen kantajaksi valitun sisällön kanssa, mutta joka eroaa alkuperäisestä kantajasta tilastollisten ominaisuuksiensa puolesta [Geetha et al., 2009]. Algoritmi, jonka avulla salatun tiedon tarkoituksenmukainen vastaanottaja purkaa tiedon lukukelpoiseksi, hyödyntää tätä tilastollista eroa lisätyn sisällön erottelussa ja sitä voidaan myös hyödyntää pyrkimyksissä murtaa salausta. Geetha ja muut [2009] viittaavat erityisesti digitaalisten vesileimojen lisäämiseen ja niihin kohdistuviin väärinkäytöksiin, mutta periaatetta voidaan varmasti soveltaa myös muissa tarkoituksissa tehtyyn steganografiaseen salaukseen. Stegoanalyysissä kulloinkin hyödynnettävä tilastollisen analyysin taktiikka riippuu kantajan tiedostotyyppistä ja tiedostotyyppin tilastollisista ominaisuuksista sekä epäilystä tiedonsalauksessa käytetystä metodista [Wang & Wang, 2004].

Ashok ja muut [2010] mainitsevat, että esimerkiksi *bitmap*-tyyppisillä kuvatiedostoilla on tunnistettavia ja ennakoitavia ominaisuuksia, joita voidaan käyttää avuksi lisättyä tietosisältöä haravoitaessa. Käytännön esimerkki tällaisesta tunnistettavasta ominaisuudesta on bitmap-kuvien värikartta, jossa on luonnostaan varsin vähän lähestulkoon toisiaan muistuttavia, hyvin minimaalisesti toisistaan eroavia sävyjä. Jos bitmap-kuvatiedostossa voidaan kuitenkin havaita runsaasti tällaisia lähisävyjä, on syytä epäillä, että tiedostoon on upotettu salattua tietosisältöä. [Ashok et al., 2010]

Li ja muut [2011] esittelevät stegoanalyytisen mallin, joka ei vaadi kohdennetun stegoanalyysin tavoin tarkkoja alkutietoja ja jota he kutsuvat *universaaliksi stegoanalyysiksi* (universal steganalysis). Mallin mukainen stegoanalyytinen ohjelma koostuu *harjoitustasosta* (training stage) ja *testaustasosta* (testing stage) ja sen ytimessä yhteydessä molempiin ohjelman tasoihin on luokittelualgoritmi. Ensimmäisenä mainittu ohjelman taso on tarkoitettu ohjelman luokittelualgoritmin ”opettamiseen”. Harjoitustasolla ohjelmalle syötetään harjoituskuvia, joihin on sisällytetty steganografista tiedonsalausta. Harjoituskuvien avulla luokittelualgoritmi oppii tunnistamaan ja luokittelemaan steganografiaa sisältävissä kuvissa ja niiden kantajissa esiintyviä kaavamaisuuksia. Varsinai-

nen salausten tunnistaminen ja purku tapahtuu algoritmin testaustasolla, jossa analyysin välineenä käytetään testikuvien avulla opetettua luokittelualgoritmia. Tämän tyyppinen esiluokittelu nopeuttaa stegoanalyysin suorittamista. Kun potentiaalista steganografista salausta sisältävät tietomassat on ensin luokiteltu salauksen olemassaolon ja salauksen tyyppin tunnistavan algoritmin avulla, voidaan kaventaa tutkittavaa tietomassaa huomattavasti ja tutkia luokittelussa kiinni jääneitä tietosisältöjä tehokkaasti spesifimpien keinojen avulla. [Li et al., 2011]

Li ja muut [2011] tekevät myös lyhyen katsauksen stegoanalyysin suurimpiin tulevaisuuden haasteisiin. Heidän mukaansa olennaista olisi kehittää stegoanalyttisiä algoritmeja, joiden avulla on mahdollista havaita, minkä tyyppistä steganografiaa salauksessa on käytetty, mitkä ovat olleet salauksen parametrit ja mihin kantajan osiin salattua tietoa on lisätty. Li ja muut [2011] mainitsevat myös, että yhteistyö digitaalisen rikostutkinnan kanssa voi tuoda merkittäviä hyötyjä stegoanalyttisten algoritmien kehittämistyöhön. Li ja muut tarkastelevat erityisesti kuviin lisättyä steganografiaa, eivätkä steganografiaa yleisesti, mutta toki voidaan olettaa, että nämä tulevaisuuden tavoitteet ovat päteviä myös muun kuin kuvamediaan upotetun steganografian yhteydessä.

3.2. Teknisiä ongelmia

Steganografian ehdoton etu on sen joustavuus: steganografian avulla salattua materiaalia on mahdollista upottaa mihin tahansa digitaaliseen sisältöön. Salattun informaation kantajaa koskee tosin rajoite: kantajatiedoston kapasiteetti määrittää sen, kuinka paljon siihen voidaan upottaa sisältöä. Myös kantajan tiedostomuoto saattaa tuottaa hankaluuksia tietoa upotettaessa. [Cheddad et al., 2010] Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tietoa ei voi salata steganografian avulla pelkästään salattavan tiedon ehdoilla, vaan myös kantajan valinnassa pitää käyttää harkintaa.

Geetha ja muut [2009] määrittävät steganografisen algoritmin käytännössä murretuksi silloin, kun on olemassa jokin metodi, jonka avulla salattun sisällön olemassaolo kantajassa voidaan varmentaa onnistumistodennäköisyydellä, joka on suurempi kuin satunnaisten arvausten onnistumistodennäköisyys. Muiden merkittävien tiedonsalaustekniikoiden paremmuus sen sijaan mitataan algoritmin vahvuudessa tai toisin sanoen sen kestävyudessa [Cheddad et al., 2010]. Kun huomioidaan stegoanalyysissä hyödynnettävät tekniikat ja steganografisen salauksen murtamisen määritelmä, voidaan todeta, ettei salausalgoritmin voimakkuus ole aina välttämättä merkittävä tekijä steganografisen salauksen onnistumisessa. Jos steganografista salausta ei ole toteutettu kunnolla, se voidaan periaatteessa murtaa hyvinkin alkeellisilla keinoilla. Esimerkiksi kuvatie-

dostoon huonosti upotettu steganografinen sisältö voidaan havaita jopa paljaalla silmällä, eikä tällöin ole salauksen kannalta merkittävää, kuinka hyvin salausalgoritmi kestää murtautumisyriä. Toki algoritmi pitää purkaa, jotta upotetusta tietosisällöstä saataisiin selvää, mutta tässä tapauksessa steganografinen salaus on jo murrettu ja toisaalta toisinaan salatun sisällön turmeleminen voi olla murtaajille riittävä tavoite upotetun tiedon sisällön selvittämisen sijaan. Cheddad ja muut [2010] esittävät yksinkertaisen ratkaisuehdotuksen tilanteeseen, jossa sisällytetty salaus voitaisiin havaita vertaamalla muokattua kuvaa alkuperäiseen: luodaan täysin uusi kuva salattavan tiedon kantajaksi ja tuhoaan alkuperäinen kuva, kun tiedon upottaminen on suoritettu. Cheddadin ja muiden [2010] mukaan verkosta löytyvien kuvien hyödyntäminen kantajina ei ole suositeltavaa tunnistamiskäytön vuoksi. Petitcolas ja muut [1999] mainitsevat myös erääksi steganografisen salauksen riskiksi sen, että steganogrammiin tehdyt tiedonsalaukseen liittymättömät muutokset upotettua dataa sisältävään tiedostoon usein tuhoavat lisätyn sisällön ja tekevät sen näin hyödyttömäksi. Esimerkkinä voisi toimia vaikkapa digitaalinen vesileima, josta tulee lukukelvoton kuvanmuokkauksen seurauksena.

4. Läheisiä tekniikoita

Steganografialla on paljon yhteisiä piirteitä kahden muun tiedonsalauksen tekniikan *kryptografian* ja *digitaalisten vesileimojen* kanssa, joten steganografiasta kirjoitettaessa on mielekästä myös nostaa esiin, mikä näitä tekniikoita erottaa ja mikä niille on yhteistä. Esimerkiksi Singh ja Singh [2013] sekä Petitcolas ja muut [1999] nostavat kryptografian ja steganografian väliset erot esille määritellesään steganografian käsitettä. Seuraavaksi esitellään tärkeimmät näitä tekniikoita yhdistävät ja erottavat piirteet.

4.1. Steganografia ja kryptografia

Ennen erottelun tekemistä on syytä määritellä kryptografia lyhyesti. Mollin [2000] kuvaa kryptografiaa peittelemättömäksi salatuksi kirjoitukseksi. Tällä tarkoitetaan sitä, että salattu informaatio ja se fakta, että kyseinen informaatio ylipäänsä on salattu, ovat selkeästi havaittavissa toisin kuin steganografiassa, jossa koko informaation olemassaolo pyritään piilottamaan [Mollin, 2000]. Kryptografian tarkoituksena on siis tehdä informaatio lukukelvottomaksi kaikille muille kuin niille osapuolille, joille viestinvaihto on tarkoitettu [Zielinska et al., 2014]. Kryptografisen salauksen purkamiseen pyrkivää työtä kutsutaan *kryptoanalyysiksi* hieman samaan tapaan kuin steganografian tunnistukseen ja purkamiseen pyrkivää toimintaa kutsutaan *stegoanalyysiksi* [Mollin, 2000].

Steganografialla ja kryptografialla on paljon yhteistä. Esimerkiksi Singh ja Singh [2013] ja Zielinska ja muut [2014] mainitsevat, että tekniikoiden tavoite eli kommunikaatio, jonka vain halutut osapuolet ymmärtävät, on sama, mutta sen onnistumista tavoitellaan eri keinoilla. Ashok ja muut [2010] ehdottavat, että tekniikat voidaan nähdä sukulaistekniikoina, joissa on toisaalta yhtenäisyyksiä, mutta joiden tavoite on eri. Tässä tulee huomata, että Singh ja Singh ja Zielinska ja muut tarkoittavat tavoitteesta puhuessaan koko tiedonsalausprosessin lopullista tavoitetta eli salattua kommunikaatiota. Ashok ja muut puolestaan tarkoittavat toteuttamisen teknisiä tavoitteita, eli esimerkiksi sitä, millainen on salattu lopputuote. Joka tapauksessa Ashokin ja muiden [2010] mukaan steganografiaa ja kryptografiaa käytetään digitaalisessa ympäristössä suojaamaan informaatiota ei-toivotuilta osapuolilta.

Merkittävin ero steganografian ja kryptografian välillä on siinä, kenelle piilotettu informaatio on näkyvää ja kenelle ei. Kun informaatio on salattu vain kryptografisilla menetelmillä, sen olemassaoloa ei ole peitelty ja periaatteessa kuka tahansa voi havaita informaation olemassaolon. Informaation sisältö on kuitenkin sekoitettu jollakin käytetyllä kryptografisella metodilla niin, ettei sen sisältöön ole mahdollista päästä käsiksi ilman sopivaa avainta tai jotakin toimivaa kryptoanalyttista keinoa. Steganografiassa koko viestin olemassaolo pyritään piilottamaan ulkopuolisilta tarkkailijoilta. Toisin kuin steganografiassa, kryptografisessa salauksessa pyritään lopputulokseen, joka on laskennallisesti mahdollisimman vaikeaa murtaa. [Mollin, 2000; Zielinska et al., 2014; Ashok et al., 2010]

Steganografian ja kryptografian väliset eroavaisuudet eivät suinkaan sulje pois sitä mahdollisuutta, että molempia tekniikoita hyödynnettäisiin yhtä aikaa. Esimerkiksi Ashok ja muut [2010] argumetoivat, että vaikka sekä kryptografia että steganografia ovat hyviä tiedonsalaustekniikoita, molemmilla on heikkouksensa ja molemmat ovat murrettavissa. Voisi siis olettaa, että molempien tekniikoiden yhdistely tuottaisi vielä varmemman salauksen kuin tekniikat yksinään.

4.2. Steganografia ja digitaaliset vesileimat

Myös steganografialla ja digitaalisella vesileimaamisella on paljon yhteistä. Esimerkiksi Wang ja Wang [2004], Katariya [2012] sekä Cox ja muut [2008] tunnistavat tekniikoiden välisen yhtäläisyyden. Eroakin tekniikoiden väliltä löytyy: merkittävämmäksi eroksi kirjallisuuden perusteella nousevat tekniikoiden soveltamistarkoitukset. Cox ja muut [2008] huomauttavat tämän lisäksi, että kolmen edellä mainitun tekniikan väliset perustavanlaatuiset erot vaikuttavat merkittävästi kuhunkin tekniikkaan kohdistuviin odotuksiin ja täten myös niiden teknologiseen suunnitteluun ja toteutukseen. Tästä voidaan päätellä, että

myös tekniikoiden toteutuksissa on oltava jonkin verran merkittäviä eroja toisiinsa verrattuna.

Digitaalisella vesileimaamisella tarkoitetaan prosessia, jossa digitaaliseen resurssiin, kuten kuvaan, äänitiedostoon tai videoon, upotetaan informaatiota, jonka avulla on mahdollista varmistaa resurssin aitous tai suojata resurssin omistajien tekijänoikeuksia. Käytännössä tämä voisi tarkoittaa esimerkiksi jonkin paljaalle silmälle näkymättömän tai himmeästi näkyvän ”allekirjoituksen” lisäämistä kuvatiedostoon. Digitaalisten resurssien käytön hyödyllisyyttä murentavia huonoja puolia ovat laittoman kopioinnin mahdollisuus, falsifikaatio eli kopioiden tekeminen alkuperäisestä kappaleesta, huono tekijänoikeussuoja sekä vaikeus identifioida resurssin omistaja. Joko näkyvän tai näkymättömän digitaalisen vesileiman lisääminen resurssiin voi toimia apuna näiden puutteiden korjaamisessa. Digitaalinen vesileima luodaan esimerkiksi syöttämällä tietynlainen digitaalinen signaali digitaaliseen äänitiedostoon tai esimerkiksi muokatuista pikseleistä muodostuva kaava digitaaliseen kuvatiedostoon. [Kattariya, 2012] Edellä mainittu pikselisisältöön upotettava kaava voi esimerkiksi olla pikseleistä muodostuva logo tai jokin muu kuvio, joka auttaa yhdistämään sisällön tekijäänsä tai omistajaansa. Täten voidaan todeta, että ainakin teknisen toteutuksensa puolesta digitaaliset vesileimat ovat hyvin lähellä steganografiaa.

Osa tekniikoiden ominaisuuksista kuitenkin erottaa digitaaliset vesileimat ja steganografian toisistaan. Wang ja Wang [2004] mainitsevat merkittävämäksi eroavaisuudeksi tekniikoiden käyttötarkoituksen ja sen, mikä osa digitaalista kokonaisuutta kumpaakin tekniikkaa käytettäessä kommunikoi. Wangin ja Wangin mukaan digitaalisia vesileimoja käytettäessä alkuperäinen digitaalinen resurssi on se osa, joka on tarkoitettu kommunikaation välineeksi ja lisätty digitaalinen sisältö on mukana vain turvaamassa resurssin tekijänoikeuksia. Steganografiassa puolestaan varsinainen kommunikaatio liittyy sisällytettyyn, piilotettuun viestiin ja alkuperäinen digitaalinen resurssi on lähinnä piilotetun viestin naamio tai kantaja. Wang ja Wang mainitsevat myös, että digitaalisia vesileimoja käytettäessä on usein tapana ilmoittaa tai näyttää avoimesti, että resurssissa on lisättyä sisältöä. Steganografiaa hyödynnettäessä puolestaan on tavoitteenmukaista, ettei piilotetusta sisällöstä tietämättömät myöskään pääse selville sen olemassaolosta.

5. Steganografian alalajit

Kirjallisuuskatsauksen perusteella steganografiaa voidaan myös luokitella eri alalajeiksi erilaisilla perusteilla. Luokitteluja voidaan tehdä muun muassa aiemmin mainitun historialliseen ja moderniin steganografiaan luokittelun lisäksi viestin kantajana toimivan mediatyyppin tai hyödynnetyn salausprotokol-

lan perusteella. Esimerkiksi Ashok ja muut [2010] luokittelevat steganografiaa viestin kantajana toimivan median perusteella tekstiin kohdistuvaksi steganografiaksi, ääneen kohdistuvaksi steganografiaksi ja kuviin kohdistuvaksi steganografiaksi. Zielinska ja muut [2014] lisäävät listaan myös verkkotekniikkaan liittyvän steganografian, joka on myös steganografian sovellusaloista selvästi nuorin. Verkkosteganografia käyttää hyväkseen erilaisten verkkoprotokollien, kuten OSI Open System Interconnection -malliin kuuluvien protokollien signaaleja. Koska signaalin lähetys on reaaliaikaista, steganografisten viestin lisääminen on potentiaalisesti hyvin tehokasta: hienovaraisten muutosten havaitseminen reaaliaikaisesta tietovirrasta paljaalla silmällä tai korvalla on äärimmäisen hankalaa, toisin kuin esimerkiksi lisätyn sisällön havaitseminen staattisesta kuvasta, jota on mahdollista tarkastella pidempään kerralla. Useat kirjoittajat mainitsevat myös videoihin lisättävän steganografisen sisällön, mutta käytännössä uskoisin, ettei se eroa edellä mainituista luokitteluista erityisen paljon, vaan siihen voidaan soveltaa esimerkiksi kuvaan ja ääneen liittyviä tekniikoita muutamien videotiedostomuotojen erityispiirteitä hyödyntävien tekniikoiden lisäksi.

Steganografista viestiä kantavan median tyyppi ei ole ainoa tapa luokitella steganografiaa eri alalajeihin. Ashok ja muut [2010] jaottelevat steganografian kolmeen erityyppiseen protokollaan sen mukaan, kuinka salattavaa viestiä käsitellään upotettaessa se kantavaan digitaaliseen resurssiin. Nämä kolme protokollatyyppiä ovat *puhdas steganografia* (pure steganography), *salaisen avaimen steganografia* (secret key steganography) sekä *julkisen avaimen steganografia* (public key steganography). Näistä steganografian eri tyypeistä puhtaassa steganografiassa salattavaa viestiä ei upottamisen lisäksi salata erillisen avaimen avulla. Kaksi jälkimmäistä tyyppiä puolestaan yhdistelevät sekä steganografiaa että kryptografiaa tiedon salauksessa. Ashok ja muut mainitsevat näistä kolmesta tyyppistä julkisella avaimella vahvistetun steganografian varmimmaksi tiedonsalausmenetelmäksi. [Ashok et al., 2010]

Steganografisia teknologioita on mahdollista luokitella vielä tarkemmin. Esimerkiksi Mollin [2000] nostaa esiin perinteisen steganografian parista viestin piilottamisen johonkin fyysiseen välineeseen. Mollin nimittää tätä tekniikaksi (*technical*) steganografiaksi. Koska *tekninen* on mielestäni suomen kielessä moniselitteinen ilmaus ja sekoittaa helposti keskenään englannin kielen ilmaukset *technical* ja *technological*, voisi Mollinin nimityksen kääntää mielestäni myös *välineelliseksi* steganografiaksi. Myös esimerkiksi kuvatiedostoihin sovellettavaa steganografiaa voidaan luokitella vielä hienovaraisemmin sen perusteella, millä perusteella kantajaksi valitun kuvatiedoston pikseleitä muokataan [Singh & Singh, 2013; Wang & Wang, 2004].

Cheddad ja muut [2010] esittelevät tekniikan, joka hyödyntää yhtä aikaa sekä digitaalista että analogista sisältöä. Japanilainen yhtiö Fujitsu kehittää teknologiaa, jonka avulla steganografiaa voidaan upottaa osaksi perinteistä tulostusprosessia. Steganografinen sisältö upotetaan osaksi tulostettavaa kuvaa, josta upotettua sisältöä ei näe paljaalla silmällä. Kun kuvaan piilotettu viesti halutaan lukea, kuva skannataan mobiililaitteen kameralla ja tällä tavoin piilotettu viestisisältö voidaan palauttaa luettavaan muotoon. Tässä yhdistelmässä steganografinen tiedonsalaus toteutetaan digitaalisesti, tulostetaan analogisesti näkyviin fyysiseen tuotteeseen ja sisällön tulkinta suoritetaan jälleen digitaalisen tekniikan avulla. Sovellusta voidaan hyödyntää esimerkiksi lääkeresepteissä, käärepapereissa, käyntikorteissa ja painetussa mediassa, kuten lehtikuvissa [Cheddad et al., 2010].

Seuraavaksi perehdytään steganografisen salauksen toteuttamiseen ja tekniikoihin eri mediatyyppejä edustavissa kantajissa.

5.1. Steganografia ja kuva

Kuvat ovat ainakin toistaiseksi suosituin ja sovelletuin alusta steganografiselle salaukselle. Tästä syystä kuvasteganografiaan kohdistuu myös muita tekniikoihin suuremmat vaatimukset. Digitaaliseen kuvasteganografiaan kohdistuva stegoanalyysi on myös varsin edistynyt, joten paljastumisen riski on suurempi kuvasteganografiaa käytettäessä kuin se olisi silloin, jos käytössä olisi jokin vähemmän tutkittu tekniikka.

Esimerkiksi Wang ja Wang [2004] ja Ashok ja muut [2010] mainitsevat yhteinä huomionarvoisimpana kuviin ja muihinkin digitaalisen median sisältöihin kohdistuvana steganografisena tekniikkana tiedoston binäärikoodauksen *vähiten merkityksellisiin bitteihin* tehtävät muutokset (least significant bits, LSB). LSB:hen tehtävät muutokset ovat myös yksi vanhimmista tutkituista digitaalisen steganografian tekniikoista [Zielinska et al., 2014]. LSB-muunnokset eivät riittävän huolellisesti toteutettuna aiheuta alkuperäiseen kuvaan niin merkittäviä muutoksia, että ne olisivat havaittavissa paljaalla silmällä. LSB-muunnosten avulla voidaan tehdä merkityksellisiä muutoksia kuvatieoston spatiaalisiin sekä taajuudellisiin ominaisuuksiin [Cheddad et al., 2010]. LSB-muunnosten heikkous on se, etteivät ne ole kovin vahvoja erilaisten hyökkäysten edessä. Ashokin ja muiden [2010] mukaan esimerkiksi muutokset kantajana toimivaan kuvaan tai kuvan tiedostomuotoon ovat upotetun informaation kannalta tuhoisia.

Wang ja Wangin [2004] sekä Ashokin ja muiden [2010] mukaan toinen suosituimmista kuvasteganografian lähestymistavoista LSB-muunnosten ohella on erilaisten *maskaus-* ja *suodatustekniikoiden* (masking & filtering) käyttö. Wang ja Wang [2004] kuvaavat näiden tekniikoiden toimivan samalla tavalla kuin nä-

kyvän vesileiman lisääminen kuvaan toimii: tieto upotetaan kuvaan korostamalla tai himmentämällä joitakin alueita kuvasta. Kun maskaustekniikan avulla piilotetaan tietoa näkyvistä, muutokset suoritetaan yleensä joillekin kantajakuvasta pseudosatunnaisesti valituille pikseleille. Luonnollisesti valittujen pikselien muutosprosentti pidetään niin matalana, ettei muutosta ole mahdollista havaita paljaalla silmällä. Maskaus- ja suodatustekniikat eivät ole LSB:n tavoin herkkiä kantajakuvaan tehdyille muutoksille [Ashok et al., 2010].

Cheddad ja muut [2010] lukevat maskaustekniikan yhdeksi *joustavan steganografian* (adaptive steganography) metodiksi. Joustavat steganografian tekniikat ottavat huomioon kantajana toimivan kuvan yleiset tilastolliset ominaisuudet ennen kuin kuvaan pyritään tekemään muutoksia LSB-muunnosten tai jonkin vastaavan tekniikan avulla. Käytännössä kantajakuvan tilastolliset ominaisuudet sanelevat joustavaa steganografiaa sovellettaessa sen, mihin kohtaan kuvaa muutoksia voidaan lisätä. Joustavassa tekniikassa stegodata upotetaan satunnaisesti kuvasta valitulle pikselialueelle, jossa on korkea alueellinen keskijajonta, eli toisin sanoen paljon vaihtelua pikselien välillä. Tasaisia alueita on syytä välttää, kun taas kohinaa sisältävät alueet soveltuvat tiedon upottamiseen. [Cheddad et al., 2010]

Cheddad ja muut [2010] esittelevät myös monia muita kuvasteganografian sovellustekniikoita. Steganografiaa voidaan lisätä kuviin myös hyvin yksinkertaisilla keinoilla, jotka eivät tosin ole erityisen vahvoja murtamista vastaan. Periaatteessa steganografiaksi lasketaankin myös yksinkertaiset muutokset, joita on mahdollista tehdä kuvan formaattia hyväksikäyttämällä. Tällaisia yksinkertaisia tekniikoita ovat esimerkiksi viestin kirjoittaminen jonkin kuvan kuvaukseen sen EOF-tagin (End of File tag) jälkeen. Tämä toteutetaan käytännössä avaamalla kuvatiedosto esimerkiksi Notepad-sovelluksella ja kirjoittamalla jotakin kuvan kuvauksen loppuun. EOF-tagin perään lisätyllä tekstillä ei ole vaikutuksia kuvan varsinaiseen ilmiäsuun. Toinen samantyyppinen heikohko, mutta steganografian määritelmän täyttävä metodi on piilotetun datan lisääminen kuvan metadataan (Extended File Information, EXIF). EXIF on digitaalisten kameroiden valmistajien standardi, jolla ilmoitetaan esimerkiksi kuvaamiseen käytetyn kamerasen malli, kuvan valotusaika ja muuta kuvaamiseen liittyvää tietoa. [Cheddad et al., 2010]

5.2. Steganografia ja teksti

Tekstiin kohdistuva steganografia voidaan jaotella löyhästi *tekstuaaliseen steganografiaan* (textual steganography) sekä *lingvistiseen steganografiaan* (linguistic steganography). Tekstuaaliset metodit kohdistuvat tekstitiedoston teknisiin ominaisuuksiin, kun taas lingvistiset metodit kohdistuvat voimakkaammin tekstin sisältöön. Ensimmäiset digitaaliset tekstiin kohdistuvat steganografiset

salaukset toteutettiin manipuloimalla sanavälejä (word spacing) tekstitiedostoissa. [Zielinska et al., 2014] Tämä tekniikka voidaan lukea tekstuaaliseksi steganografiaksi. Myöhemmin on hyödynnetty myös jalostuneempia tekstuaalisen steganografian keinoja, kuten tiettyyn merkitykseen yhdistettäviä muutoksia tekstitiedoston pilkutuksessa tai sanajärjestyksessä. Ashok ja muut [2010] esittelevät myös muutamia muita mielenkiintoisia tekstuaalisen steganografian metodeja: merkityksellinen binäärikoodaus voidaan tuottaa esimerkiksi siirtämällä jokaista tekstissä esiintyvää riviä tai sanaa halutun binääriarvon mukaisesti joko alaspäin, ylöspäin tai sivusuunnassa. Tekstuaalista steganografiaa voidaan kohdistaa myös vielä tarkemmin tekstin ominaisuuksiin esimerkiksi muuntamalla tekstissä esiintyvien kirjaimien ominaisuuksia. Tämä on Ashokin ja muiden [2010] mukaan mahdollisesti luotettavin tekstuaalisen steganografian metodi, sillä kirjainmerkeillä on suuri määrä ominaisuuksia, joihin muutokset voidaan kohdistaa, eivätkä muutokset ole täten välttämättä silmiinpistäviä. Käytännössä muutokset voidaan kohdistaa kirjainmerkkejä käsiteltäessä esimerkiksi *b*-kirjaimen pystyviivan pituuteen tai *u*-kirjaimen suhteelliseen leveyteen. [Zielinska et al., 2014; Ashok et al., 2010]

Zielinska ja muut [2014] esittävät esimerkkinä lingvistiksestä steganografiasta *SPAM-metodin* (SPAM-method), jossa tieto upotetaan *kontekstittoman kieliopin* (context free grammar) avulla. Tässä tutkielmassa ei paneuduta syvällisemmin siihen, mitä kontekstiton kielioppi pitää sisällään. On kuitenkin syytä mainita, että steganografian kannalta hyödyllinen ja sovellettava kontekstittoman kieliopin osa on sen hierarkkinen rakenne, josta oikeat sanat valitsemalla voidaan tuottaa merkityksellinen koodaus binääridataa varten. Zielinska ja muut huomauttavat, että SPAM-metodilla tuotetut sisällöt eivät kuitenkaan ole steganografiaa puhtaimmillaan, sillä niissä sisältö luodaan kokonaan alusta alkaen itse, eikä tietoa siis upoteta valmiiksi olemassaolevaan kantajaan. [Zielinska et al., 2014] Tekstiin pohjautuva steganografia ei ole missään nimessä sidottua asiakirjamuotoisiin tekstitiedostoihin: esimerkiksi Garg [2011] esittelee tekniikan, jossa steganografian avulla salattua tietoa upotetaan HTML-dokumentiin eli verkkosivun rakennetta kuvaavaan tiedostoon. Garg mainitsee ehdottamansa tekniikan vahvuudeksi sen, että HTML-attibuutteihin tehty muutokset eivät näy millään tavalla valmiissa dokumentissa, eli julkaistussa *www-sivussa*.

Garg [2011] pitää tekstiin lisättyä steganografiaa erityisen haasteellisenä toteuttaa siksi, että tekstitiedostoissa esiintyy varsin vähän redundanttia eli toistuvaa dataa, johon haluttu tietosisältö voitaisiin piilottaa. Gargin mukaan esimerkiksi kuva- ja äänitiedostoissa tällaista dataa esiintyy paljon enemmän. Ashok ja muut [2010] mainitsevat tekstiin lisättävän steganografian toiseksi

heikoksi kohdaksi tekstin helpon muokattavuuden: salatun tiedon näkökulmasta katsottuna steganografiaa sisältävä tekstitiedosto on helppoa turmella pienellä vaivalla joko muokkaamalla itse tekstisisältöä tai vaihtamalla tekstitiedoston tiedostomuotoa esimerkiksi .TXT -tiedostosta .PDF-tiedostoksi.

5.3. Steganografia ja ääni

Äänitiedostot ovat steganografian kantajina sekä haasteellisia, että houkuttavia. Bhattacharyyan ja muiden [2011] mukaan äänitiedostoihin sisältyy tyypillisesti paljon redundanssia sekä toisaalta ennalta-arvaamattomuutta. Nämä tyypilliset ominaisuudet tekevät äänitiedostoista varsin houkuttavan alustan steganografian soveltamiseen. Ashok ja muut [2010] sekä Nosrati ja muut [2012] korostavat puolestaan äänitiedostojen käytön ongelmia, jotka liittyvät ihmisen kuuloalueen tarkkuuteen. Ihmiskuulo on hyvin tarkka havaitsemaan äänenvoimakkuuden ja äänen taajuuden vaihteluita ja se on myös varsin herkkä havaitsemaan äänen yhteydessä olevaa *kohinaa* (noise), jota äänitiedostoon usein ilmaantuu steganografiaa sovellettaessa. Toisaalta ihmiskuulo ei ole erityisen hyvä erottelemaan ääniä toisistaan ja esimerkiksi kuuloalueen rajoilla olevat hyvin matalat äänet peittävät helposti alleen äänet, jotka ovat hyvin hiljaisia. Steganografisia algoritmeja suunniteltaessa on syytä pyrkiä käyttämään hyväksi erityisesti edellä mainitun tapaisia ihmiskuulon rajoitteita. [Ashok et al., 2010; Nosrati et al., 2012]

Seuraavaksi esittelen neljä yleisintä metodologiaa, joiden avulla steganografiaa voidaan soveltaa äänitiedostoihin. Ensimmäiseksi on syytä mainita, että kuten kuvatiedostoihin, myös äänitiedostoihin voidaan lisätä piilotettua dataa LSB-periaatteen avulla. Myös äänitiedostoihin on mahdollista tuottaa hienovaraisia muutoksia puuttumalla tiedoston binäärimuodossa esiintyviin vähiten merkityksellisiin bitteihin. LSB:n soveltamisen merkittävin haaste on siitä helposti aiheutuva kohina. Toinen merkittävä äänisteganografinen metodi muokkaa yksittäisten bittien sijaan pidempiä jaksoja (phase coding) äänitiedostossa. *Phase coding* -metodi ei toisaalta tuota äänitiedostoon kohinaa, mutta toisaalta se ei myöskään sovellu erityisten suurten tietomäärien upottamiseen. Kolmas mainitsemisen arvoinen äänisteganografian lähestymistapa *Spread Spectrum Coding* levittää piilotettavan datan äänitiedostoon koko käytettävissä olevalle taajuualueelle. Tämä tekniikka voi olla LSB-tekniikkaa ja jaksoja käsittelevää tekniikkaa tehokkaampi käyttää, mutta toisaalta siihen liittyy myös kohinan lisääntymisen riski. Neljännessä mainittavassa metodissa luodaan ensin äänitiedostoon alkuperäistä signaalia vastaava kaiku (echo data hiding). Sen jälkeen haluttu data piilotetaan muokkaamalla kaikusignaalin parametrejä tarpeen mukaan. Kaikuun perustuva salaus on ainakin Bhattacharyyan ja muiden [2011] mukaan varsin vahva tekniikka, sillä kaiusta valitaan muokattavaksi sellaiset pa-

rametrit, jotka ovat ihmisen kuuloalueen rajoilla ja vaikea havaita paljaalla korvalla. [Ashok et al., 2010; Bhattacharyya et al., 2011; Nosrati et al., 2012] Joitakin äänitiedostoihin perustuvista steganografian tekniikoista on sovellettu viime aikoina myös verkkoliikenteeseen [Zielinska et al., 2014]. Steganografiasta ja verkkoliikenteestä kerrotaan lisää seuraavassa kohdassa.

5.4. Steganografia verkkoliikenteessä

Verkkoliikenteeseen sisällytettävä steganografinen salaus on nouseva trendi, joka vastaa osittain haasteisiin, joita mediatiedostojen käyttäminen salatun tiedon kantajina tuo mukanaan. Verkkoliikenteen kapasiteettiin verrattuna perinteisiin mediatiedostoihin on mahdollista upottaa varsin pieniä määriä dataa yhtä mediatiedostoa kohden. Toisaalta mediatiedostojen käytössä on myös olemassa se riski, että salauksen olemassaolo on kohtuullisen helppoa selvittää, jos sitä tutkiva taho saa jotenkin käsiinsä alkuperäisen mediatiedoston. Verkkoliikennettä käsiteltäessä tällaista alkuperäistä mediatiedostoa ei ole olemassa ja tietoa on mahdollista upottaa tarpeen vaatiessa hyvinkin pieninä määrinä kerrallaan ja sitten ”vuotaa” eteenpäin. Verkkosteganografia on mediatiedostoihin perustuvaa steganografiaa hankalampaa paljastaa ja eliminoida verkostoista. [Zielinska et al., 2014]

Verkkoliikenteeseen liittyy kolme merkittävää heikkoutta, joita hyödynnetään verkkosteganografian soveltamisen yhteydessä. Ensimmäinen merkittävä verkkoliikenteen heikkous on se, että reaaliaikaisessa tietovirrassa esiintyy luonnostaankin virheitä ja pieniä häiriöitä, joten lisätyn sisällön tuomia hienovaraisia muutoksia on varsin vaikeaa havaita. Erityisen vaikeaa muutosten havaitseminen on silloin, kun piilotettu sisältö on lisätty tiedonsiirtosignaaliin sellaisen metodin avulla, joka imitoi verkkoliikenteessä esiintyviä luontaisia virheellisyyskysymyksiä. Toinen merkittävä verkkoliikenteessä esiintyvä heikkous on myös monissa mediatiedostoissa esiintyvä redundanssi: myös verkkoliikenteeseen liittyy jonkin verran itseään toistavaa dataa, johon on mahdollista upottaa lisättyä sisältöä ilman, että lisätyt muutokset haittaavat millään tavalla verkkoliikenteen toimintaa. Kolmas verkkoliikenteen heikkous liittyy siihen, ettei joista olemassaolevaa tiedonsiirtoprotokollaa ole määritetty erityisen tarkkarajaisesti, vaan joidenkin protokollien toteutukseen liittyy jonkin verran toteuttajan valinnanvapautta. Tätä tarkan määrittelyn puutetta on mahdollista käyttää hyväksi, sillä kun määrittely oikeasta toteutustavasta puuttuu, ei ole myöskään mahdollista vertailla, liittyykö tiedonsiirron toteutukseen jotakin ylimääräistä vai ei. [Zielinska et al., 2014]

Mazurczyk [2013] esittelee verkkosteganografian sovelluksia, jotka perustuvat *VoIP-tekniologiaan* (Voice over IP) hyödyntämiseen tiedonsalauksen kanavana. VoIP-tekniologialla tarkoitetaan reaaliaikaisia palveluja, joiden avulla

käyttäjät voivat tehdä puheluita toisilleen IP-dataverkkoja hyödyntäen [Mazurczyk 2013]. Esimerkkejä VoIP-palveluista ovat esimerkiksi Skype ja GoogleTalk. Zielinskan ja muiden [2014] mukaan VoIP-steganografiaan liittyy kaksi puolta: toisaalta VoIP-palveluiden yhteydessä steganografisia sisältöjä voidaan lisätä puhelun yhteydessä digitoituun ääneen, jolloin tiedonsalaus muistuttaa digitaaliseen mediaan upotettavaa steganografiaa. Kun salaus kohdistetaan digitoidun äänen muutoksiin, monet äänisteganografian yhteydessä mainituista salausmetodeista ovat käyttökelpoisia. Toisaalta steganografiset muutokset voidaan kohdistaa myös johonkin spesifiin VoIP-protokollan osaan tai protokollan toimintaan noin yleisesti. VoIP-steganografian vahvuutta voidaan myös lisätä huomattavasti käyttämällä tiedonpiilotukseen jonkinlaista hybridimallia, jossa tiedonsalaus yhdistelee sekä ääneen, että verkkoliikenteeseen kohdistuvia metodeja. [Zielinska et al., 2014; Mazurczyk et al., 2013]

6. Pohdintaa

Tutkielmassa tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella on mielestäni syytä nostaa esille neljä huomionarvoista steganografiaan ja sen tuoreisiin trendeihin liittyvää seikkaa.

Ensimmäinen ajatuksia herättävä asia on steganografian asema suhteessa muihin tiedonsalauksen tekniikoihin. Kryptografia on ollut ainakin viime vuosiin asti ehdottomasti merkittävimmissä asemassa digitaalisten tiedonsalaustekniikoiden keskuudessa. Tämä seikka oli osittain esitetty kirjallisuudessa eksplisiittisesti ja toisaalta sen voi myös lukea rivien välistä: on hyvin yleistä määritellä steganografia ensisijaisesti sen kautta, miten se eroaa kryptografiasta. Vaikuttaisi kuitenkin siltä, että osittain viime vuosina esiintyneiden tietoturvariskien kuten Stuxnet-madon tai tietovuotojen johdosta steganografia on saamassa entistä merkittävämpää jalansijaa varteenotettavana tiedonsalauksen tekniikkana. Tässä tutkielmassa tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella tämä trendi vaikuttaa varsin oikeutetulta muutenkin kuin vain tietoturvariskeihin varautumisen kannalta: steganografia on varsin monipuolinen ja oikein sovellettuna vahva tiedonsalauksen tekniikka, jota voi soveltaa sekä itsenäisesti, että täydentävänä tekniikkana yhdessä kryptografisen salauksen kanssa.

Toiseksi on myös syytä huomioida, että vaikka kirjallisuuden perusteella kuvasteganografia on toistaiseksi steganografian sovellusalueista käytetyin, olisi tulevaisuudessa aiheellista kääntää katse hienovaraisempiin steganografian tekniikoihin. Syy tähän on toisaalta se, että mitä käytetympi steganografinen tekniikka on, sitä varmemmin sitä vastaan on myös kehitetty tehokkaita steganalyttisiä työkaluja. Toisaalta olisi syytä kiinnittää erityisesti huomiota verkosteganografian tapaisten sovellusten kehittämiseen, sillä sitä hyödynnettäessä

sä vaikuttaisi olevan perinteisiin medioihin verrattuna paljon pienempi riski siihen, että ihminen voisi pelkästään aistien varassa havaita steganografisen salauksen olemassaolon.

Kolmas huomionarvoinen seikka liittyy steganografian soveltamiseen ja eettisiin kysymyksiin. Toisaalta steganografinen salaus on mahdollista nähdä tietoturvariskinä, mutta kuten kirjallisuudesta kävi ilmi, sitä voidaan käyttää myös moniin hyödyllisiin tarkoituksiin. Tekniikan haitta- tai hyötypotentiaali riippuu voimakkaasti käyttötarkoituksesta ja myös siitä, kuka tekniikkaa soveltaa. Vaikka kirjallisuudessa näyttäisikin toisinaan olevan tapana kirjoittaa steganografiasta juuri jostakin valitusta näkökulmasta, on mielestäni syytä huomioida, että steganografia ja toisaalta myös stegoanalyysi ovat itsessään tekniikoina useimpien muiden tekniikoiden tapaan arvoneutraaleja. Tässä tutkielmassa tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella steganografiaa voidaan soveltaa etiikan koko kirjon mukaisesti. Toisaalta sitä voidaan soveltaa rikollisiin tarkoitukseen hyödyntämällä sitä vahinkoa aiheuttavissa haittaohjelmissa. Toisaalta sitä voidaan soveltaa varsin neutraalisti esimerkiksi metadatan upottamisessa tietosisältöihin. Lisäksi on myös mahdollista hyödyntää steganografisia tekniikoita rikollisuuden vastaisissa sovelluksissa, kuten tekijänoikeuksien toteutumista vahvistavissa digitaalisissa vesileimoissa.

Viimeisenä on mielestäni syytä mainita se, että kirjallisuuden perusteella näyttäisi siltä, että mobiiliteknologia hämärtää jossakin määrin perinteisen ja digitaalisen steganografian välistä rajapintaa. Luvussa 5 esiteltiin lyhyesti Fujitsun kehittämä steganografiaa sisältävä teknologia, jossa salattua tietoa voidaan upottaa printattaviksi tarkoitettuihin sisältöihin ja joista se sitten luetaan mobiililaitteen kameralla QR-koodin tapaan ja tulkitaan tämän jälkeen jälleen digitaalisesti. Osaltaan tämä hyvin mielenkiintoinen tekninen lähestymistapa hämärtää digitaalisen ja analogisen väliin melko karkeasti vedettyä viivaa ja vaikuttaisi siltä, että steganografiaa voisi olla mahdollista soveltaa myös osana niin sanottua jokapaikan tietotekniikkaa. Ehkäpä steganografian tapaisia tekniikoita voisi esimerkiksi soveltaa tulevaisuudessa osana entistä suorakäyttöisempää tietotekniikkaa, jossa esimerkiksi QR-koodien kaltaisten keinokeinoisten välineiden sijaan olisi mahdollista operoida ilmiänsultaan paljon luonnollisempien tiedonkantajien välityksellä. Tämän tutkielman perusteella uskoisin, että steganografian tekniikoilla on tietoturvasovellusten ohella myös paljon muunlaista, innovatiivista potentiaalia.

Viiteluettelo

[Ashok et al., 2010] Jammi Ashok, Y. Raju, S. Munishankaraiah and K. Srinivas,

- Steganography: an overview. *International Journal of Engineering Science and Technology* **2**, 10 (2010), 5985– 5992.
- [Bhattacharyaa et al., 2011] Souvik Bhattacharyaa, Indradip Banerjee and Gautam Sanyal, A survey of steganography and steganalysis technique in image, text, audio and video as cover carrier. *Journal of Global Research in Computer Science* **2**, 4 (2011).
- [Cheddad et al., 2010] Abbas Cheddad, Joan Condell, Kevin Curran and Paul Mc Kevitt, Digital image steganography: survey and analysis of current methods, *Signal Processing* **90**, 3 (2010), 727–752.
- [Cox et al., 2008] Ingemar J. Cox, Matthew L. Miller, Jeffrey A. Bloom, Jessica Fridrich and Ton Kalker, *Digital Watermarking and Steganography (Second Edition)*. Morgan Kaufmann, 2008.
- [Geetha et al., 2009] S. Geetha, Siva S. Sivatha Sindhu and N. Kamaraj, Blind image steganalysis based on content independent statistical measures maximizing the specificity and sensitivity of the system, *Computers & Security* **28**, 7, 683–697.
- [Garg, 2011] Mohit Garg, A novel text steganography technique based on HTML documents. *International Journal of Advanced Science and Technology*. **35**, (2011), 129–138.
- [Katariya, 2012] Shraddha S. Katariya, Digital watermarking: review. *International Journal of Engineering and Innovative Technology* **1**, 2 (2012), 143–153.
- [Li et al., 2011] Bin Li, Junhui He, Jiwu Huang, Yun Qing Shi, A survey on image steganography and steganalysis, *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing* **2**, 2 (2011), 142–172.
- [Mazurczyk, 2013] Wojciech Mazurczyk, VoIP steganography and its detection – a survey, *ACM Computing Surveys* **46**, 2 (2013), article 20.
- [Mollin, 2000] Richard A. Mollin, *An Introduction to Cryptography*. CRC Press, 2000.
- [Nosrati et al., 2012] Masoud Nosrati, Ronak Karim and Mehdi Hariri, Audio steganography: a survey on recent approaches. *World Applied Programming* **2**, 3 (2012), 202–205.
- [Petitcolas et al., 1999] Fabien A. P. Petitcolas, Ross J. Anderson and Markus G. Kuhn, Information hiding – A survey. *Proceedings of the IEEE* **87**, 7 (1999), 1062–1078.
- [Singh and Singh, 2013] Sandeep Singh and Aman Singh, A review on the various recent steganography techniques. *International Journal of Computer Science and Network* **2**, 6 (2013), 142–156.
- [Wang and Wang, 2004] Huaiqing Wang and Shuozhong Wang, Cyber

warfare: steganography vs. steganalysis. *Communications of the ACM* **47**, 10 (2004), 76–82.

[Zielinska et al., 2014] Elzbieta Zielinska, Wojciech Mazurczyk and Krzysztof Szczypiorski, Trends in steganography. *Communications of the ACM* **57**, 3 (2014), 86–95.

Tiedonlouhinta web-hakukoneiden lokerista infodemiologisen tutkimuksen menetelmänä

Tuuli Kähkönen

Tiivistelmä.

Web-hakukoneiden käyttäjien toiminnasta tallentamaa dataa voidaan käyttää epidemiologisessa tutkimuksessa hyödyntämällä tiedonlouhinnan menetelmiä. Tässä tutkielmassa esitellään hakukoneiden lokidataa aineistona käyttävien infodemiologisten tutkimusten tiedonlouhintamenetelmiä sekä yleisemmin web-tiedonlouhinnan hyötyjä ja puutteita epidemiologisen tutkimuksen menetelmänä sekä siihen liittyviä eettisiä kysymyksiä.

Avainsanat ja -sanonnat: hakukoneet, tiedonlouhinta, infodemiologia.

1. Johdanto

Internetin käyttö kasvaa jatkuvasti kaikkialla maailmassa. Hakukoneiden käyttö on yksi yleisimmistä internetin käyttötavoista ja suosituimmat, kaupalliset hakukoneet käsittelevätkin miljardeja kyselyitä vuosittain. Esimerkiksi Google-hakukoneelle käyttäjät tekevät yli biljoona kyselyä vuodessa. [Internet Live Stats, 2014]

Hakukoneet tallentavat automaattisesti dataa niille tehdyistä kyselyistä. Kyselyn sisältämien termien lisäksi tallennetaan myös metadataa, kuten aika- ja paikkatietoja, kyselyn tehneen käyttäjän käyttäjätunnus tai eväste ja käyttäjän klikkaamat linkit tulossivulla. Tätä tallennettua dataa ja metadataa kutsutaan web-hakukoneen lokiksi.

Tiedonlouhinnalla tarkoitetaan merkityksellisen tiedon eristämistä suuresta datamassasta, jota ei useimmiten ole kerätty ensisijaisesti tutkimusta varten. Tiedonlouhinnan menetelmiä ovat pääasiassa tilastolliset ja koneoppimisen menetelmät sekä tiedonlouhintaa varten erikseen kehitetyt menetelmät.

Epidemiologia on lääketieteen ala, joka tutkii tautien esiintyvyyden ja niiden vaaratekijöiden suhdetta. Web-hakukoneiden lokidatan hyödyntämisen epidemiologisessa tutkimuksessa voidaan katsoa kuuluvan *infodemiologisen* (infodemiology) tutkimuksen piiriin. Infodemiologia on tiede, joka tutkii elektronisessa mediassa, erityisesti internetissä, esiintyvää informaatiota kansanterveyden näkökulmasta. Infodemiologian hyödyntämisestä sairauksien leviämisen seurannassa käytetään englanninkielistä, huonosti kääntynyttä ilmausta *infoveillance*, joka on yhdistelmä sanoista *information* ja *surveillance*. [Bernardo *et al.*, 2013]

Infodemiologinen tutkimus on aina hypoteesien generointia – löydetään aiheita ja yhteyksiä, joita olisi syytä tutkia muilla menetelmillä. Tutkimuksien tulokset eivät sellaisinaan kerro reaaliaikailman ilmiöistä. [Bernardo *et al.*, 2013]

Tässä tutkielmassa esitellään tiedonlouhintamenetelmiä, joita on käytetty infodemiologisessa tutkimuksessa, jossa aineistona on ollut web-hakukoneen loki-data. Kaikki menetelmät ja esimerkit on poimittu alan viimeaikaisista tutkimuksista.

Esiteltujen tutkimusten aineistot ovat pääasiassa suurten, kaupallisten hakukoneiden lokidataa, mutta joissain tutkimuksissa aineisto on kerätty evästeiden avulla, jolloin on hakukoneisiin tehtyjen kyselyiden lisäksi ollut käytössä myös muuta dataa käyttäjän internet-toiminnasta.

Tutkielmassa käsitellään vain sellaisia menetelmiä, joissa on hyödynnetty aineiston erilaisten käyttäjäpopulaatioiden eroja. Käyttäjäpopulaatiolla tarkoitetaan sellaista joukkoa aineistosta löytyviä käyttäjiä, jonka oletetaan edustavan tutkimuksen kohteena olevaa ihmisryhmää. Tällaisella tutkimuksella voidaan tutkia siis esimerkiksi tiettyä lääkettä käyttäviä potilaita, jotka aineistossa ovat tietyllä perusteella muista käyttäjistä erottuvia hakukoneen käyttäjiä.

Tutkielman toisessa luvussa kuvataan käyttäjien valitsemista käyttäjäpopulaatioihin, ja siinä käytettyjä menetelmiä ja kriteereitä. Kolmannessa luvussa tarkastellaan käyttäjäpopulaation hakuhistorian analyysiä ja käyttäjäpopulaatioiden vertailemista toisiinsa. Neljännessä luvussa käsitellään käyttäjäpopulaation toiminnan ennustamista tiedonlouhinnan menetelmin. Käyttäjäpopulaation toiminnan vaiheista voidaan myös pyrkiä muodostamaan vaiheittainen malli.

Viides luku käsittelee hakulokidatan vertaamista ja yhdistämistä muihin aineistoihin. Tutkimuksissa käytettyjä aineistoja ovat muun muassa lääketieteelliset tietokannat, kyselytutkimukset ja muu käyttäjien toiminnasta koottu data hakulokien lisäksi. Toiseen aineistoon vertaamista voidaan käyttää esimerkiksi lokidatasta tehtyjen päätelmien validoimiseksi.

Kuudennessa luvussa pohditaan infodemiologisessa tutkimuksessa hyödynnettyjen tiedonlouhintamenetelmien hyötyjä, sovelluskohteita ja puutteita sekä aiheeseen liittyviä eettisiä kysymyksiä. Kuudennessa luvussa annettuja esimerkkejä ei ole samalla tavoin rajattu käyttäjäpopulaatioiden ominaisuuksia hyödynnäviin tutkimuksiin, kuin aiemmissa luvuissa, koska tietoa isommasta kategoriasta tutkimuksia oli enemmän saatavilla. Kuvailut hyödyt, haitat ja mahdolliset sovellukset koskevat kuitenkin myös muissa luvuissa käsitellyjä menetelmiä.

Seitsemännessä luvussa tehdään yhteenveto tutkielmassa käsitellyistä asioista, pohditaan käsittelemättä jääneitä aiheita ja avoimia kysymyksiä.

2. Kiinnostavien käyttäjien tunnistaminen

Jotta hakukonelokin avulla voisi tarkastella tilastollisesti jonkin ihmisryhmän hakuhistoriaa tutkimusta varten, täytyy ensin erottaa kiinnostuksen kohteena oleva käyttäjäpopulaatio kaikista muista hakukoneen käyttäjistä. Yksinkertaisimmillaan tämä voidaan tehdä niin, että valitaan populaatioon ne käyttäjät, jotka ovat tarkasteltavana olevan hakuhistoriansa jakson aikana tehneet kyseilyitä, joissa esiintyy tutkimuksen kohteeseen liittyvä termi. Yom-Tov ja muut [2014b] käyttävät tällaista menetelmää. He tulkitsevat käyttäjän olevan tietyn massatapahtuman kannalta relevantti, jos käyttäjä on tehnyt tarkastellun hakuhistorian ajanjakson aikana vähintään kaksi kyselyä, joissa tapahtuman nimi esiintyy.

Myös Ofra ja muut [2012] käyttävät samankaltaista menetelmää. He katsovat käyttäjän kuuluvan tutkimuksen kohderyhmään (syöpäpotilaat ja näiden lähiomaiset), mikäli tämä on tehnyt kyselyn tai kyselyitä, joissa esiintyy jonkin yleisen syöpäsairauden nimi ja klikannut vähintään viittä linkkiä näiden hakujen tuloksista. Tällä tavoin tutkittavaan käyttäjäpopulaatioon saadaan vain ne käyttäjät, joilla kiinnostus tutkimuksen kannalta olennaiseen asiaan on riittävän suuri.

Richardson [2008] esittää matemaattisen mallin asian kuvaamiseksi. Jos $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ on käyttäjien joukko ja $D = \{ \langle u, q, t \rangle \}$ on aineiston sisältämä kokoelma monikkoja, joiden jäsenet ovat käyttäjä u , kysely q ja aikaleima t , tietyn käyttäjän u kiinnostus tiettyyn kyselyyn q voidaan ilmaista merkitsemällä $int(u, q)$. Kiinnostus voi merkitä yksinkertaisesti sitä, että käyttäjä on tehnyt kyseisen kyselyn vähintään kerran, mutta malliin voidaan lisätä ehtoja, kuten tietty määrä kyselykertoja.

Jotkin käsitteet ovat niin laajoja, että niistä kiinnostuneiden käyttäjien poimimiseksi aineistosta ei riitä vain yhden termin esiintyvyyden tarkkailu käyttäjän hakuhistoriassa. Tämän ongelman ratkaisemiseksi tutkimuksissa on käytetty kyselyn laajentamismenetelmiä. Kyselyn laajentaminen voidaan tehdä joko manuaalisesti lääketieteellisen kirjallisuuskatsauksen avulla [White *et al.*, 2013] tai automaattisia menetelmiä hyödyntämällä [White *et al.*, 2014]. Näistä jälkimmäisessä lähestymistavassa alkuperäiset listat tutkittavista sairauksista, lääkkeistä ja oireista saadaan lääketieteellisistä lähteistä. Tämän jälkeen web-hakukoneen lokista etsitään sivuja, joille käyttäjät ovat päätyneet tekemällä kyselyjä, joissa esiintyy jokin sairaus-, lääke- tai oirelistalla oleva sana. Kyselyjä laajennetaan ottamalla mukaan yleisimpiä muita kyselyjä, joilla on myös päädytty kyseisille sivuille.

Myös Yom-Tov ja Gabrilovich [2013] käyttävät automaattista menetelmää kyselyn laajentamiseen. Heidän menetelmässään alkuperäinen lista oireista saadaan Wikipediasta, mitä perustellaan sillä, että Wikipedia on yleinen terveystiedon lähde. Wikipediaa listan lähteenä käyttämällä saavutetaan myös menetelmän helppo sovellettavuus eri kielille. Oireita kuvaavia kyselyjä laajennetaan ottamalla mukaan jokaista oiretta kohti hakukoneen lokista kaksi yleisintä kyselyä, joilla käyttäjät ovat päätyneet oireesta kertovaan Wikipedia-artikkeliin. Lisäksi kyselyjä laajennetaan ottamalla mukaan jokaista oiretta kohti kaksi viidenkymmenen ensimmäisen hakutuloksen joukossa yleisimmin esiintyvää sanaparia (leksikaalista affiniteettia), kun on tehty kysely oireen nimellä.

Web-hakukoneiden lokit ovat aineistona hyvin suuria ja osittain vaikeatulkintaisia. Käyttäjät voivat viitata samalla termillä useampaan eri asiaan ja samastakin asiasta haetaan tietoa eri syistä. Ei voida siis välttää sitä, että tutkittavaan käyttäjäpopulaatioon tulee mukaan myös epärelevantteja käyttäjiä, eli ihmisiä, jotka eivät kuulu tutkimuksen kohderyhmään. Epärelevanttien käyttäjien osuutta on pyritty pienentämään rajaamalla käyttäjäpopulaatiota erilaisin menetelmin. Yom-Tovin ja muiden [2014a] käyttäjäpopulaatio koostuu käyttäjistä, jotka ovat tehneet kyselyjä, joissa esiintyy mielialaa tasaavien lääkkeiden nimiä. Yksi tarkasteltavista termeistä on "Lithium", mikä on huomattavan epämääräinen, koska sitä voidaan käyttää myös haettaessa tietoa alkuaineesta tai akuista. Tämän vuoksi termiä "Lithium" kyselyissään käyttäneet käyttäjät, jotka eivät hakenneet mihinkään muuhun lääkkeeseen liittyvällä termillä, käsiteltiin tutkimuksessa omana ryhmänään.

White ja muut [2014] karsivat aineistostaan pois hakuja tekeviä ohjelmia (jotka eivät siis ole todellisia käyttäjiä) poistamalla käyttäjät, jotka ovat tehneet yli 1000 kyselyä yhden päivän aikana tutkimukseen kuuluvalla ajanjaksolla. Whiten ja muiden kohderyhmä koostuu syöpäpotilaista ja heidän läheisistään, ja he pyrkivät siksi rajaamaan pois myös lääketieteen ammattilaiset, jotka saattavat tehdä osittain samanlaisia kyselyjä kuin kohderyhmään kuuluvat käyttäjät. Tutkittavaan käyttäjäpopulaatioon ei oteta mukaan niitä käyttäjiä, joiden kyselyistä 20 % sisältää lääketieteellisiä termejä heidän hakuhistoriansa ensimmäisen kuukauden aikana. Tällaisten käyttäjien tunnistamiseen on käytetty ennustavaa tilastollista menetelmää.

3. Tutkittavien käyttäjäpopulaatioiden hakuhistorian analysointi

3.1. Käyttäjäpopulaation kiinnostuksen kohteiden tutkiminen

Valitun käyttäjäpopulaation hakuhistorian analysointi on yksi web-hakukoneiden lokeja hyödyntävän tutkimuksen tärkeimmistä vaiheista. Usein jo pelkäämällä näillä menetelmillä saadaan lisää tietoa tutkimuksen kohteesta. Whiten ja muiden kehittämässä menetelmässä [2014] tarkastellaan kiinnostuksen kohteena olevaan lääkkeeseen liittyvillä termeillä hakeneita käyttäjiä ja verrataan näiden koottua hakuhistoriaa ennen ja jälkeen sen ajankohdan, kun he olivat ensimmäistä kertaa tehneet lääkkeeseen liittyvän kyselyn. Kun tarkastellaan johonkin tiettyyn oireeseen tai sairauteen liittyvien termien esiintymistä näissä kootuissa hakuhistorioissa, voidaan johtaa yhteyksiä eri lääkkeiden ja mahdollisesti niistä aiheutuvien sivuvaikutusten välillä.

Richardsonin [2008] mallilla voidaan ilmaista, miten paljon kyselyt riippuvat toisistaan, eli voidaan esimerkiksi etsiä kyselyitä, jotka ovat useimmin esiintyneet samoilla käyttäjillä kuin jokin tietty kysely. Merkitään $n(q)$:lla kyselystä q kiinnostuneiden käyttäjien määrää ja $n(q, r)$:llä sekä kyselyistä q ja r kiinnostuneiden käyttäjien määrää. Todennäköisyyttä, että satunnaisesti valittu käyttäjä on kiinnostunut kyselystä r , merkitään $p_r = n(r)/N$, kun N on kaikkien käyttäjien määrä aineistossa. Kyselyn q riippuvuus kyselystä r on $dep_r(q) = n(q, r)/n(q)$. Tällä tavoin laskiessa harvinaiset kyselyt aiheuttavat vääristymiä, ja sen vuoksi käytetään tasoittavaa vakiota m , joka kuvaa niiden käyttäjien määrää, jotka ovat kiinnostuneita kyselystä q , mutta joita aineisto ei sisällä: $dep_r(q) = \frac{n(q, r) + mp_r}{n(q) + m}$. Kaavaa voi käyttää sekä kyselyiden että yksittäisten termien yhteyksien tarkasteluun.

Richardson [2008] esittää myös, kuinka koottujen hakuhistorioiden avulla voidaan luoda automaattisesti eri aiheisiin liittyviä termejä sisältäviä klustereita. Etsitään edellä kuvaillulla menetelmällä termejä, jotka riippuvat kaikkein eniten tarkastellusta termistä. Aiheen laajuutta ja termien yleisyyden tasoa voidaan säätää muuttamalla tasoitusvakiota m . Tällöin saadaan synonyymien ja yksityiskoh- taisten termien sijaan yleisempiä ja laajempia termejä. Myös tarkasteltavan ajan- jakson pituudella on merkitystä. Esimerkiksi vain yksittäisen session perusteella ei vielä saada luotua kovin kuvaavia aiheklustereita, vaan siihen vaaditaan käyttäjien pidemmän aikavälin hakuhistorioiden hyödyntämistä.

Richardson esittelee edelleen menetelmän, jolla voidaan tutkia käyttäjäpopu- laation kiinnostuksen kohteiden kehittymistä ajan myötä. Siinä tarkastellaan, mitkä termit ovat yleisimpiä käyttäjien kyselyissä, kun on kulunut jokin tietty aika ensimmäisen tutkittavaan aiheeseen liittyvän kyselyn jälkeen.

Käyttäjäpopulaation kiinnostuksen kohteiden muuttumista tarkastelevat myös West ja muut [2013]. Heidän tutkimuksensa käyttäjäpopulaatioon on valittu käyttäjät, joiden on tulkittu olevan sitoutuneita laihduttamiseen. Käyttäjien hakuhistoriasta otetaan huomioon kyselyt sata päivää ennen ja jälkeen sen päivän, kun sitoutuneisuus laihduttamiseen on havaittu. Näistä kyselyistä päätellään automaattisesti, kuinka todennäköisesti ne koskevat reseptejä, dieettejä, ruokaa tai terveyttä. Jokaiselle käyttäjälle lasketaan näistä neljästä ominaisuudesta keskiarvo jokaista yksittäistä hakuhistorian päivää kohden. Sitten muodostetaan jokaista päivää kohden kaikkien populaatioon kuuluvien käyttäjien keskiarvo. Näin saadaan tarkasteltua käyttäjien kiinnostuksen kehittymistä laihduttamiseen liittyviin asioihin ennen ja jälkeen oletetun laihduttamisesta tehdyn päätöksen.

3.2. Käyttäjäpopulaatioiden vertailu

Richardson [2008] havaitsi, että tietyllä termillä jonain ajankohtana kyselyn tehneen käyttäjäpopulaation hakuhistoria eroaa vielä useiden kuukausien päästäkin tähän populaatioon kuulumattomien käyttäjien hakuhistoriasta. Tätä hän perustelee laskemalla todennäköisyysjakauman valituille termeille sekä tietylle käyttäjäpopulaatiolle että kaikille käyttäjille. Sen jälkeen jakaumia vertaillaan KL-divergenssillä. KL-divergenssi on menetelmä, jolla mitataan kahden todennäköisyysjakauman eroavaisuutta. Richardsonin laskema KL-divergenssi laskee, kun aikaa tietyn kyselyn tekemisestä kuluu, mutta pysyy hyvin pitkään sillä tasolla, että käyttäjäpopulaatioissa voidaan katsoa olevan eroa.

Yom-Tov ja Gabrilovich [2013] vertaavat kahta käyttäjäpopulaatiota toisiinsa käyttämällä tilastollista testausta. Taulukossa 1 kuvataan heidän käyttämäänsä menetelmää. He tarkastelevat käyttäjiä, jotka ovat tehneet kyselyn tai kyselyitä jostain tietystä sivuosoitteesta. Lisäksi tarkasteluun otetaan myös jokin tietty lääke. Päivä 0 määritellään siksi päiväksi, jolloin käyttäjä ensimmäisen kerran on tehnyt kyselyn lääkkeeseen liittyvillä termeillä. Niille käyttäjille, jotka eivät ole tehneet lääkkeeseen liittyvää kyselyä, päivä 0 määritellään heidän hakuhistoriansa puoliväliin. Taulukkoon lasketaan kaikki kerrat, kun kyselyitä sivuosoitteesta on tehty. χ^2 -testin perusteella he laskevat myös *kyselylokin sivuvaikutuspistemäärän* (query log reaction score, QLRS), joka ilmaisee sivuvaikutuksen ilmenemistä seurauksena lääkkeen käytöstä. Vertaamalla kohderyhmää niihin käyttäjiin, jotka eivät ole tehneet kyselyä lääkkeestä, saadaan poistettua esimerkiksi vuodenaikojen ja muiden ympäristötekijöiden vaikutukset. Samaa menetelmää käyttävät myös Yom-Tov ja muut [2014b]. He varmistavat tuloksen tilastollisen merkitsevyyden vielä käyttämällä FDR-raja-arvoa eli virheellisten löydösten osuutta.

Taulukko 1. Kontingenssitaulukko χ^2 -testausta varten. [Yom-Tov and Gabrilovich, 2013]

Milloin käyttäjä teki kyselyn sivuoireesta?	Tekikö käyttäjä kyselyn lääkkeestä?	
	Ei	Kyllä
Ennen päivää 0	N11	N12
Jälkeen päivän 0	N21	N22

Yom-Tov ja Gabrilovich soveltavat menetelmäänsä myös kahden lääkkeen yhteisvaikutusten etsimiseen. Tässä tapauksessa tarkastellaan kolmea käyttäjäpopulaatiota: niitä, jotka ovat tehneet kyselyn tai kyselyitä ensimmäisestä lääkkeestä, niitä, jotka ovat tehneet toisesta ja niitä, jotka ovat tehneet molemmista. Tehdään tilastollisen regressioanalyysin avulla malli sivuvaikutuksiin liittyvien termien esiintymisestä kahden ensimmäisen käyttäjäpopulaation perusteella ja verrataan sitä kolmanteen populaatioon. Huomattavasti ennusteesta poikkeavien sivuvaikutustermien esiintymien tulkitaan olevan kahden lääkkeen yhtäaikaisen käytön aiheuttamia yhteisvaikutuksia.

4. Käyttäjäpopulaation toiminnan ennustaminen

Käyttäjäpopulaation hakukäyttäytymisestä voidaan muodostaa malli, jonka avulla voidaan myös ennustaa esimerkiksi populaatioon kuuluvan käyttäjän seuraavan kyselyn aihe. Malleja voidaan käyttää myös jonkin kohderyhmän tiedonhaun kokonaiskuvan hahmottamisessa.

Yom-Tov ja muut [2014a] tutkivat mielialaa tasaavien lääkkeiden nimillä kyselyitä tehneitä käyttäjiä. He huomaavat, että populaatioon kuuluvien käyttäjien kyselyiden aihekategoriat poikkeavat heidän tavanomaisesta hakukäyttäytymistään muutamia päiviä ennen ja jälkeen lääkitykseen liittyvien kyselyjen tekemisen. Kyselytutkimuksesta saadun tiedon perusteella he päättelivät, että käyttäjät saattavat tehdä lääkitykseen liittyviä kyselyitä erityisesti maanisten mielialajaksojen aikana.

Tutkimuksessa käyttäjien hakukäyttäytymistä kuvataan eri ominaisuuksien vektorina, jossa otetaan huomioon esimerkiksi eri aihekategorioihin kuuluvien kyselyiden osuus, kyselyiden kokonaismäärä, yöaikaan tehtyjen kyselyiden määrä ja viikonpäivä. Yhteensä yhden käyttäjän päivittäistä hakukäyttäytymistä kuvaamaan käytetään 1981 attribuuttia.

Attribuuttien avulla opitaan päätöspuu, joka ennustaa, tekeekö käyttäjä seuraavana päivänä mielialaa tasaavaan lääkkeeseen liittyvän kyselyn. Tilastollinen

testaus osoittaa, että toistuvasti lääkekyselyitä tehneiden populaatiolle rakennettu päätöspuu eroaa merkittävästi vain "lithium"-kyselyn tehneiden käyttäjien, joista suurin osa ei ole mielialahäiriöistä kärsiviä ihmisiä, puusta. Tämä osoittaa, että päätöspuulla voidaan ennustaa, tekeekö käyttäjä jonain ajankohdana tietynlaisen kyselyn, jos käyttäjän edustama populaatio noudattaa hakukäyttäytymisessään jotain tiettyä kaavaa.

Ofran ja muut [2012] tutkivat käyttäjäpopulaationsa tiedonhaun vaiheita. Kaikki sivut, joita käyttäjät ovat klikanneet, luokitellaan manuaalisesti eri aihepiireihin. Tiedonhaun vaiheita hahmotellaan rakentamalla Markovin piilomalli käyttäjäpopulaation hakuhistorian perusteella. Mallin rakentamiseen käytettiin 75 % käyttäjäpopulaatiosta ja sitä testattiin lopuilla 25 %.

Markovin prosessi on sattumanvaraisesti etenevä prosessi, jossa historialla ei ole merkitystä seuraavan tapahtuman kannalta. Markovin piilomalli kertoo taustalla olevan Markovin prosessin siirtymätodennäköisyydet tilasta toiseen, kun tilojen lukumäärä on tiedossa. Tutkimuksessa valitaan siis Markovin piilomallille se määrä tiloja, joka ennustaa parhaiten testipopulaation seuraavan kyselyn aiheen. Markovin piilomallin avulla saadaan selville käyttäjäpopulaation tiedonhaun vaiheet sen perusteella, minkä aiheisia sivuja käyttäjät suosivat milloinkin ja se, missä järjestyksessä nämä vaiheet yleensä etenevät. Käyttäjäpopulaatioita voidaan myös vertailla vertailemalla niille tehtyjä Markovin piilomalleja.

5. Hakulokin vertailu ja yhdistäminen muihin aineistoihin

Usein tutkimuksessa käytetään hakukoneen lokin lisäksi myös jotain muuta aineistoa. Toiseen aineistoon vertaamalla voidaan validoida tutkimuksen tulosta tai jotain sen alkuoletusta. Muita aineistoja voidaan myös käyttää käyttäjäpopulaation valitsemisen apuna tai osana analysoitavaa dataa.

Yom-Tov ja Gabrilovich [2013] sekä White ja muut [2014] pyrkivät validoimaan hakukoneen lokista löytämänsä lääkkeiden sivuvaikutukset vertaamalla niitä AERS-tietokannasta löytyviin sivuvaikutuksiin. AERS on Yhdysvaltain lääke- ja elintarvikeviraston hyväksyttyjen lääkeaineiden sivuvaikutusseurantaohjelman tietokanta. Oireiden ja lääkkeiden yhteisesiintymistä AERS-tietokannassa tutkitaan samoilla synonyymilistoilla, joita tutkimuksessa käytetään web-hakukoneen lokin analysointiin.

Yom-Tov ja Gabrilovich laskevat Spearmanin korrelaation oirelistoille ja valitsevat viisi oiretta, joiden poistaminen listoista lisää korrelaatiota eniten. Tämä toistetaan jokaiselle tarkasteltavalle lääkkeelle. Näin valittuja oireita nimitetään *ristiriitaisimmiksi sivuoireiksi* (most discordant adverse drug reactions). Ristiriitaisimmat sivuoireet korostuvat joko AERS-tietokannassa tai hakukonelokissa. Hakukonelokissa korostuvien sivuoireiden voidaan tulkita olevan lääkkeen uusia,

ennen tuntemattomia sivuoireita, jotka olisi syytä ottaa lisätutkimuksen kohteeksi.

Yom-Tov ja muut [2014b] pyrkivät osoittamaan sairauteen liittyvien termien esiintymisen hakukoneen lokissa todella tarkoittavan sairauden esiintymistä reaali maailmassa vertaamalla termien esiintymistä sairauden esiintymisprofiiliin, jossa on otettu huomioon taudin itämisaika. Samantyyppistä validointia käyttävät Ofran ja muut [2012]. He vertaavat tiettyyn sairauteen liittyvien termien esiintymistä lokissa kyseisen sairauden todellisiin esiintymismääriin. Vertailussa otetaan huomioon myös hakukoneen käyttäjien erilainen ikäjakauma verrattuna muuhun väestöön.

Yom-Tov ja muut [2014a] vertailevat saamiaan tuloksia tekemänsä kyselytutkimuksen tuloksiin. Tarkoituksena on varmistaa, että hakukoneen lokin pohjalta tehdyt päätelmät tietyn kohderyhmän tiedonhausta ovat oikeita. Sen jälkeen voidaan olla varmempia siitä, että myös muut aineistosta tehdyt päätelmät ovat oikeita, sekä varmistua siitä, että otos hakukoneen käyttäjiä vastaa tarpeeksi kattavasti kohderyhmään kuuluvia ihmisiä.

Joskus on hyödyllistä valita käyttäjäpopulaatio jonkin muun aineiston perusteella. Westin ja muiden [2013] evästeiden avulla koottu aineisto sisältää käyttäjien tekemien hakujen lisäksi myös dataa heidän toiminnastaan verkkokaupoissa. He valitsevat tutkittavaan käyttäjäpopulaatioon ne käyttäjät, jotka ovat lisänneet ostoskoriinsa Amazon-verkkokaupassa jonkin laihduttamista koskevan kirjan. He perustelevat kriteeriä sillä, että kirjan ostaminen tai ostamisen harkitseminen osoittaa suurempaa sitoutumista laihduttamiseen kuin esimerkiksi laihdutukseen liittyvillä termeillä hakeminen hakukoneesta.

Ofran ja muut [2012] pyrkivät tutkimaan syöpäpotilaiden lisäksi myös heidän läheistensä tiedonhakua. Heidän käyttäjäpopulaationsa sisältää alun perin toistuvasti tiettyyn syöpäsairauteen liittyvillä termeillä hakeneita käyttäjiä, joiden oletetaan olevan syöpää sairastavia ihmisiä. Heidän aineistonsa sisältää myös tiedot siitä, keitä muita käyttäjiä käyttäjät ovat lisänneet hakukoneen tarjoaman pikaviestipalvelun kaverilistalle. Tämä tarjoaa mahdollisuuden muodostaa käyttäjäpopulaatio, joka sisältää syöpäpotilaiden ystäviä ja läheisiä.

Myös käyttäjien klikkaamien sivujen sisältöä voidaan käyttää tutkimuksen aineistona. West ja muut [2013] tutkivat hakukoneen käyttäjien ravitsemusta ja tarkastelevat käyttäjien klikkaamien reseptien yhteydessä olevia ravintoarvotietoja. Yhdistämällä nämä hakukonelokin paikka- ja aikatietoihin he analysoivat eri ravintoarvojen esiintymistä ihmisten ruokavaliossa eri vuodenaikoina ja eri maantieteellisillä alueilla.

6. Infodemiologisten tutkimusmenetelmien hyötyjä ja haasteita

Tässä luvussa käsittelen tiedonlouhintaa web-hakukoneista infodemiologisenä tutkimusmenetelmänä sekä sen etuja (reaaliaikaisuus ja edullisuus) ja haasteita (yksityisyys, luotettavuus ja oikeellisuus sekä kattavuus) verrattuna perinteisiin tutkimusmenetelmiin.

6.1. Menetelmän sovellukset ja hyödyt

Web-hakukoneista louhittua tietoa voidaan hyödyntää monessa eri käyttötarkoituksessa. Reaaliaikainen sairauksien leviämisen valvonta on yksi ilmeinen sovellus. Menetelmää voidaan käyttää myös sellaisten aiheiden tutkimiseen, joihin perinteisesti olisi käytetty kyselytutkimuksia. Voisi olla myös mahdollista toteuttaa yksittäistä potilasta hyödyttäviä sovelluksia datan perusteella.

Reaaliaikaisessa sairauksien leviämisen valvonnassa nopeus on tiedonlouhintamenetelmien ilmeisin etu. Perinteisemmät seurantamenetelmät ovat suhteellisen hitaita ja byrokraattisia. Nopeus mahdollistaa myös nopean reagoinnin ja toimenpiteet. Useissa aiheesta tehdyissä tutkimuksissa oli todettu, että tarttuvien tautien leviäminen näkyi ensin web-hakukoneiden lokeissa ja vasta vähän sen jälkeen sairaaloiden tilastoissa. Myös edullisuus on menetelmän hyöty tässäkin käyttötarkoituksessa, sillä tietoja ei tarvitse manuaalisesti kerätä ja seurantalgoritmi voi valvoa tilannetta taustalla koko ajan. [Bernardo *et al.*, 2013] Google Flu Trends [Google, 2014] on esimerkki palvelusta, joka seuraa tautien leviämistä web-hakukoneelle tehtyjen kyselyjen perusteella.

Pidempää aikaväliä koskevissa tutkimuksissa, jollaisia ovat tämän tutkielman muissa luvuissa käsitellyt tutkimukset, tiedonlouhintamenetelmän suurin etu on sen edullisuus. Tämän tyyppiset tutkimukset toteutetaan muutoin enimmäkseen laajoilla kyselytutkimuksilla, jotka ovat kalliita. Web-tiedonlouhinnalla pystytään toteuttamaan myös tutkimuksia, jotka olisivat muuten erittäin vaikeita ja kalliita järjestää.

Voitaisiin esimerkiksi tutkia elintapojen vaikutusta jonkin tietyn sairauden ilmenemiseen, mikä vaatii muutoin joko erittäin pitkäaikaista kyselytutkimusta, jossa ensin seurataan ison ihmismäärän elintapoja ja sitten jatkokyselyllä jonkin ajan kuluttua selvitetäisiin samojen ihmisten terveydentila, tai kyselytutkimusta, jossa sairastuneilta ihmisiltä kysytään jälkikäteen, millaisia elintapoja he noudattivat ennen sairastumista. Jälkimmäinen menetelmä on aina jossain määrin epäluotettava, koska siinä luotetaan vastaajien omiin muistikuviiin ja käsityksiin asioista. [Richardson, 2008]

Yksittäistä potilasta auttavia sovelluksia on myös mahdollista kehittää. Yom-Tov ja muut [2014a] pohtivat tällaista mahdollisuutta kaksisuuntaista mielialahäiriötä sairastavien ihmisten tiedonhakuun liittyen. Koska käyttäjän tekemien

kyselyjen perusteella näyttää olevan mahdollista ennustaa seuraavan maanisen jakson alkaminen ainakin päivää etukäteen, voitaisiin toteuttaa ohjelma, joka huomauttaisi tästä myös käyttäjälle, mikä lisäisi potilaan tietoisuutta omasta tilanteestaan.

Infodemiologisia menetelmiä tulisi niiden hyödyistä huolimatta käyttää vain muiden tutkimusmenetelmien rinnalla, sillä luotettavuus- ja kattavuusongelmien sekä vielä keskeneräisten tutkimusmenetelmien takia ne eivät välttämättä anna luotettavia tuloksia reaaliaikailman ilmiöistä. [Bernardo *et al.*, 2013]

6.2. Menetelmän heikkoudet ja haasteet

Tiedonlouhinta web-hakukoneiden lokeista erityisesti lääketieteellisen tutkimuksen menetelmänä sisältää myös heikkouksia ja haasteita. Haasteita aiheuttaa datan sisältämä kohina: ihmiset, jotka tekevät hakuja tiettyyn sairauteen tai lääkkeeseen liittyvillä termeillä, eivät koskaan kaikki sairasta kyseistä sairautta tai käytä kyseistä lääkettä. Internetiä ja hakukoneita käyttävät ihmiset saattavat myös poiketa muusta väestöstä demograafisesti. Yksityisyydensuoja saattaa aiheuttaa menetelmän käyttöön eettisiä ongelmia.

Käyttäjät saattavat hakea tietoa eri sairauksista monesta muustakin syystä, kuin siksi, että sairastaisivat niitä. Tämä hankaloittaa analyysijä, joissa oletetaan esimerkiksi, että tiettyä sairautta sairastava populaatio aineistossa voidaan löytää poimimalla tietyillä termeillä hakeneet käyttäjät. Eräs syy, miksi ihmiset hakevat tietoa sairauksista tai lääkkeistä on niiden näkyvyys mediassa [Carneiro and Mylonakis, 2009].

Päätelmien tekemistä käyttäjien tekemien hakujen perusteella hankaloittaa se, että internetin ja hakukoneiden käyttäjät eivät välttämättä ole edustava otos koko väestöstä. Erityisen kyseenalaiseksi käyttäjistä tehdyn otoksen kuvaavuus on asetettu kehittyvien maiden väestöstä tehdyissä tutkimuksissa [Carneiro and Mylonakis, 2009]. Toisaalta internetin käyttö on lisääntynyt kehittyvissä maissa paljon viime vuosien aikana. Zhelukin ja muiden [2013] mukaan tutkimustulokset keskitulotason maista saattavat olla jopa erityisen merkittäviä, sillä näissä maissa hyödynnetään enemmän internetin terveystietoa kuin kehittyneissä maissa.

Yksityisyyteen liittyvät eettiset kysymykset ovat oleellisia, kun hyödynnetään käyttäjien tuottamaa dataa tutkimuksen aineistona. Kaikissa tässä tutkielmassa käsitellyissä tutkimuksissa analyysi toteutettiin siten, etteivät tutkijat nähneet missään vaiheessa yksittäisen käyttäjän henkilötietoja tai edes anonymia hakuhistoriaa. Kaikissa tutkimuksissa dataa tarkasteltiin vain aggregoituina tilastoina ja yksityisyys oli siis otettu hyvin huomioon.

Kaikissa tässä tutkielmassa käsitellyissä tutkimuksissa tutkijoilla oli juridisesti käyttäjien suostumus datan käyttöön. Osassa [Yom-Tov *et al.*, 2014b; White *et al.*, 2013; West *et al.*, 2013; White *et al.*, 2014] tutkimuksista käyttäjiltä oli erikseen pyydetty suostumus siihen, että heidän tekemiään kyselyjä käytettiin tutkimuksessa. Lopuissa suostumus oli ilmaistu hyväksymällä hakukoneen käyttöehdot. Suurin osa käyttäjistä ei kuitenkaan lue käyttöehtoja, vaikka he ilmoittaisivat hyväksyvänsä ne [Bustos-Jiménez, 2014]. Avoimeksi kysymykseksi siis jää, ovatko käyttäjät todella tietoisia tuottamansa datan tutkimuskäytöstä ja miten he siihen suhtautuvat.

7. Yhteenveto

Infodemiologisia tutkimuksia, joissa on käytetty aineistona web-hakukoneiden lokeja, on tehty viime vuosina useita. Käyttäjäpopulaatioiden ominaisuuksia on tutkimuksissa analysoitu monin tavoin ja niistä on pystytty tekemään johtopäätöksiä, jotka ovat samassa linjassa muilla menetelmillä saatujen tutkimustulosten kanssa.

Kaupallisten hakukoneiden lokidataa ei koskaan julkaista avoimesti sekä käyttäjien yksityisyyden turvaamiseksi että sen sisältämien liikesalaisuuksien takia. Kaikki tässä tutkielmassa esitellyt tutkimukset on tehty yhteistyössä hakukoneyhtiöiden omien tutkimusohjelmien kanssa. Tutkimusten aineistoja ei kuka tahansa saa käyttöönsä, mikä on mahdollisesti ongelmallista tieteen avoimuuden kannalta. Toki voidaan ajatella, että tutkimusten varsinaiset tulokset ovat toistettavissa vastaavalla aineistolla, eli jonkin toisen suuren kaupallisen hakukoneen lokidatalla.

Kaikissa tässä tutkielmassa käsitellyissä tutkimuksissa käytettiin vain aineiston englanninkielisiä kyselyitä, ja useimmiten vain Yhdysvaltojen alueelta tulleita. Useissa tutkimuksissa kuitenkin todettiin, että soveltaminen muille kielille olisi periaatteessa yksinkertaista. Useilla muilla kielillä ongelmaksi muodostuisi kuitenkin aineiston pienempi määrä.

Käyttäjäpopulaatioiden ominaisuuksia tarkastelevat tutkimukset ovat vain pieni osa tutkimuksista, joissa aineistona käytetään web-hakukoneiden lokeja. Etenkin vanhemmissa tutkimuksissa käytetään muita menetelmiä, koska hakukoneet eivät ole keränneet käyttäjistä yhtä paljon dataa kuin nykyään. Uudemmissa tutkimuksissa käyttäjäpopulaatioiden tarkastelua hyödynnetään enemmän.

Toistaiseksi suurin osa hakukoneiden lokeista tehdystä tutkimuksesta, jossa hyödynnetään tiedonlouhintaa, ja etenkin siitä, jossa tutkitaan käyttäjäpopulaatioiden ominaisuuksia, on keskittynyt lääketieteen alalle tai tehostamaan haku-

koneiden omaa toimintaa. Menetelmiä voisi kuitenkin käyttää myös yhteiskunta- tai ihmistieteiden alojen tutkimuksissa [Richardson, 2008]. Olisi mielenkiintoista nähdä, mitä kaikkea web-hakukoneiden lokidata voi ihmiskunnasta paljastaa.

Viiteluettelo

- [Bernardo *et al.*, 2013] Theresa Marie Bernardo, Andrijana Rajic, Ian Young, Katie Robiadek, Mai T. Pham and Julie A. Funk, Scoping review on search queries and social media for disease surveillance: a chronology of innovation. *J. Med. Internet. Res.* **15**, 7 (Jul 2013), e147.
- [Bustos-Jiménez, 2014] Javier Bustos-Jiménez, Do we really need an online informed consent?: discussion from a technocratic point of view. In: *Proc. of*

the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication (2014), 629-634.

- [Carneiro and Mylonakis, 2009] Herman Anthony Carneiro and Eleftherios Mylonakis, Google Trends: a web-based tool for real-time surveillance of disease outbreaks. *Clin. Infect. Dis.* **49**, 10 (Nov 2009), 1557-1564.
- [Google, 2014] Google, Google Flu Trends. <http://www.google.org/flutrends/>. Checked 18.11.2014.
- [Internet Live Stats, 2014] Internet Live Stats, Google Search Statistics. <http://www.internetlivestats.com/google-search-statistics/> Checked 22.11.2014.
- [Ofra et al., 2012] Yishai Ofra, Ora Paltiel, Dan Pelleg, Jacob M. Rowe and Elad Yom-Tov, Patterns of information-seeking for cancer on the internet: an analysis of real world data. *PLoS ONE* **7**, 9 (May 2012), e124.
- [Richardson, 2008] Matthew Richardson, Learning about the world through long-term query logs. *ACM Trans. Web.* **2**, 4 (Oct 2008), Art No. 21.
- [West et al., 2013] Robert West, Ryen W. White and Eric Horvitz, From cookies to cooks: insights on dietary patterns via analysis of web usage logs. In: *Proc. of the 22nd International Conference on World Wide Web* (2013), 1399-1410.
- [White et al., 2013] Ryen W. White, Nicholas P. Tatonetti, Nigam H. Shah, Russ B. Altman and Eric Horvitz, Web-scale pharmacovigilance: listening to signals from the crowd. *J. Am. Med. Inform. Assoc.* **20**(3) (Mar 2013), 404-408.
- [White et al., 2014] R. W. White, R. Harpaz, N. H. Shah, W. DuMouchel and E. Horvitz, Toward enhanced pharmacovigilance using patient-generated data on the internet. *Clin. Pharmacol. Ther.* **96**, 2 (May 2014), 239-246.
- [Yom-Tov and Gabrilovich, 2013] Elad Yom-Tov and Evgeniy Gabrilovich, Post-market drug surveillance without trial costs: discovery of adverse drug reactions through large-scale analysis of web search queries. *J. Med. Internet Res.* **15**, 6 (Jun 2013), e124.
- [Yom-Tov et al., 2014a] Elad Yom-Tov, Ryen W. White and Eric Horvitz, Seeking insights about cycling mood disorders via anonymized search logs. *J. Med. Internet Res.* **16**, 2 (Feb 2014), e65.
- [Yom-Tov et al., 2014b] Elad Yom-Tov, Diana Borsa, Ingemar J. Cox and Rachel A. McKendry, Detecting disease outbreaks in mass gatherings using internet data. *J. Med. Internet Res.* **16**, 6 (Jun 2014), e45921.
- [Zheluk et al., 2013] Andrey Zheluk, Casey Quinn, Daniel Hercz and James A. Gillespie, Internet search patterns of human immunodeficiency virus and the digital divide in the Russian Federation: infoveillance study. *J. Med. Internet Res.* **15**, 11 (Nov 2013), e256.

Fysiologisten signaalien pohjalta tapahtuva stressin tunnistaminen ja stressin hallintaa tukevat järjestelmät

Marko Lehtonen

Tiivistelmä.

Stressi voi joskus auttaa ihmistä selviytymään vaativissa tilanteissa, mutta tarpeettomana ja pitkään jatkuvana sillä on negatiivisia vaikutuksia ihmisen fyysiseen ja psyykkiseen hyvinvointiin. Tässä tutkielmassa tarkastellaan kirjallisuuskatsauksen kautta, miten fysiologisten signaalien pohjalta voidaan tunnistaa stressiä ja minkälaisia järjestelmiä stressin hallintaan on kehitetty. Kirjallisuuden perusteella on mahdollista todeta, että fysiologiset signaalit voivat toimia luotettavina mittareina stressin tunnistamisessa. Stressin hallintaa tukevia järjestelmiä on tutkittu vähän, mutta niiden kehitys on ollut nopeaa erityisesti stressin tunnistamisen osalta. Tutkielmassa tarkasteltujen järjestelmien toiminnan perustana on tukea stressin hallintaa antamalla käyttäjälle palautetta hänen stressitasostaan.

Avainsanat ja -sanonnat: Affektiivinen tietojenkäsittely, fysiologiset signaalit, biopalaute, stressin tunnistaminen, stressinhallinta.

1. Johdanto

Pitkään jatkuneella stressillä ja negatiivisilla tunteilla on todistettusti kielteinen vaikutus ihmisten terveydentilaan, kun taas positiiviset tunnetilat voivat jopa suojella tietyiltä sairauksilta. Lisäksi tunnetilat luonnollisesti vaikuttavat ihmisen kokemaan yleiseen hyvinvointiin. Omaan tunnetilaan vaikuttaminen ja tunteiden säätely ei aina ole helppoa. Erityisesti stressaavissa ja ennalta arvaamattomissa tilanteissa säätely koetaan vaikeaksi. Ihmisten avustaminen tällaisissa tilanteissa edellyttää stressitilan tunnistamista ja sen pohjalta tapahtuvaa stressin hallinnan tukemista.

Tutkielmani tavoitteena on kirjallisuuskatsauksen avulla selvittää, millä tavoin ihmisen kanssa vuorovaikutuksessa olevat järjestelmät voivat erilaisten fysiologisten signaalien (esim. ihon sähkönjohtavuus, sydämen syke, kasvojen lihakset, aivosähkökäyrä) pohjalta tunnistaa stressiä, miten stressin hallintaa voidaan tukea ja millaisia järjestelmiä hallinnan tueksi on kehitetty.

Tutkielman lähdeaineisto hankittiin tekemällä avainsanoihin perustuneita hakuja neljään eri tietokantaan. Käytetyt tietokannat olivat ACM Digital Library, SpringerLink, ScienceDirect ja IEEE Xplore. Hakutuloksia saatiin yhteensä 73 ja niistä valittiin 12 tutkielman tavoitteen kannalta parasta lähdeettä, joista seitsemän kuvasi stressin hallintaa tukevaa järjestelmää. Hakutuloksista karsit-

tiin pois sellaisia tuloksia, joissa stressin tunnistaminen tapahtui muiden kuin fysiologisten signaalien perusteella tai ne eivät koskeneet stressin tunnistamista, hallintaa tai niihin liittyviä järjestelmiä. IEEE Xplore-tietokannan hakutuloksista valittiin ne, jotka koskivat stressin hallintaa tukevia järjestelmiä.

Aluksi luvussa 2 käsitellään yleisesti stressiä ja sen määrittelyä sekä siihen liittyen stressiä aiheuttavia tekijöitä, stressiin reagoimista ja stressinhallintaa. Sen jälkeen luvussa 3 selvitetään fysiologisten signaalien pohjalta tapahtuvaa stressin tunnistamista. Luvussa 4 huomio kohdistetaan stressin hallinnan tukemista avustaviin järjestelmiin ja lopuksi luvussa 5 tehdään yhteenvetoa.

2. Stressi

Stressi kuuluu oleellisena osana kaikkien ihmisten elämään riippumatta iästä tai muista tekijöistä (McGrady, 2007). Arkikielessä sanaa stressi käytetään vapaasti tarkoittamaan monia erilaisia epämiellyttäviä tunnetiloja. Stressin käsitettä käytetään hyvin paljon myös eri tieteenalojen yhteydessä ja siitä on monia erilaisia määritelmiä. Tässä tutkielmassa stressillä tarkoitetaan psykologista ja fysiologista stressiä.

Zautran (2003) mukaan stressin kaksi peruslajia, psykologinen stressi ja fysiologinen stressi, kuvaavat hyvin stressin luonnetta ja stressaaviin tilanteisiin sopeutumista. Nämä kaksi lajia tulevat esiin myös monissa stressin määritelmissä. Esimerkiksi Purves ja muut (2013) määrittelevät stressin psykologiseksi ja fysiologiseksi muutoksiksi, jotka ovat seurausta ihmisen reaktiosta hänen tasapainotilaansa kohdistuviin todellisiin tai koettuihin uhkiin. Nolen-Hoeksema ja muut (2009) taas esittävät stressin viittaavan koettuihin tapahtumiin, joiden ajatellaan vaarantavan fyysistä ja psyykkistä hyvinvointia.

Tässä luvussa käsitellään ensin stressiä aiheuttavia tekijöitä ja sitten ihmisen reagoimista stressiin, keskittyen erityisesti fysiologisiin reaktioihin. Lopuksi selvitetään stressinhallintaan liittyviä asioita.

2.1. Stressin aiheuttajat

Stressiä aiheuttavia tapahtumia ja tilanteita on lukematon määrä. Nolen-Hoeksema ja muut (2009) luokittelevat stressiä aiheuttavat tapahtumat traumaattisiin, kontrolloimattomiin, ennustamattomiin, suuriin elämänmuutoksiin ja sisäisiin konflikteihin liittyviin tapahtumiin.

Stressiä aiheuttavat traumaattiset tapahtumat ovat tavallisen kokemuksen ulkopuolelle jäävät tapahtumat, kuten luonnonkatastrofit, sota, onnettomuudet tai rikoksen uhriksi joutuminen. Traumaattiset tapahtumat ovat poikkeuksellisia ja suurin osa ihmisistä ei koskaan koe niitä. (Nolen-Hoeksema *et al.*, 2009).

Mahdollisuus kontrolloida tapahtumien kulkua vaikuttaa siihen, kuinka stressaaviksi ne koetaan. Mitä pienemmät mahdollisuudet tapahtumaa on kontrolloida, sitä stressaavammasi se koetaan. Yhtenä syynä stressiin on se, että jos tapahtumaa ei voi kontrolloida, niin silloin sitä ei pysty estämään. Tapahtumat voivat vaihdella vakavuusasteeltaan paljonkin. Vakava kontrolloimaton tapahtuma on esimerkiksi läheisen kuolema ja vähemmän vakava liikenne-ruuhkaan juuttuminen. (Nolen-Hoeksema *et al.*, 2009).

Tapahtumien ennustamattomuus on myös stressiä aiheuttava tekijä. Vaikka tapahtumaa ei pystyisi kontrolloimaan, niin stressin määrää yleensä vähentää se, että tietää mitä tulee tapahtumaan. Ennustamaton stressiä aiheuttava tilanne on esimerkiksi vakava sairaus, kuten pahanlaatuinen syöpä. (Nolen-Hoeksema *et al.*, 2009).

Suuret elämänmuutokset, kuten avioituminen tai eläkkeelle jääminen, vaativat uuteen tilanteeseen sopeutumista, mikä voi aiheuttaa stressiä. On siis mahdollista, että stressi liittyy myös positiivisina pidettyihin elämänmuutoksiin. (Nolen-Hoeksema *et al.*, 2009).

Ulkoisten olosuhteiden tai tapahtumien lisäksi stressiä voivat aiheuttaa myös ihmisen sisäiset konfliktit. Tällaisia sisäisiä konflikteja voi aiheuttaa esimerkiksi ratkaisemattomat ristiriidat tai vaikeat valintatilanteet. (Nolen-Hoeksema *et al.*, 2009).

2.2. Stressiin reagoiminen

Ihmiset reagoivat stressiin monin eri tavoin. Nolen-Hoeksema ja muut (2009) jakavat stressireaktiot psykologisiin ja fysiologisiin reaktioihin. Psykologisilla reaktioilla tarkoitetaan ihmisen käyttäytymiseen liittyviä reaktioita ja fysiologiset reaktiot taas liittyvät ihmisen kehossa tapahtuviin muutoksiin tämän ko-kiessa stressiä. McGrady (2007) mukaan stressiin vastaaminen voidaan nähdä monimutkaisena psykofysiologisena järjestelmänä, jonka pohjana on ihmisen aivojen ja hermoston sekä umpieritys-järjestelmän hormonaalisen säätelyn ja immuunisysteemin toiminta. Voidaan sanoa, että ihmisen stressiin reagoiminen on varsin kokonaisvaltaista.

Nolen-Hoekseman ja muiden (2009) mukaan stressaavat tilanteet tuottavat erilaisia vaihtelevia tunnereaktioita innostumisesta masennukseen. Yleisimpiä reaktioita ovat ahdistus, viha ja aggressio, apatia ja depressio sekä ajattelun toimintaan liittyvät erilaiset häiriöt (Nolen-Hoeksema *et al.*, 2009).

Nolen-Hoeksema ja muut (2009) esittävät, että ihmisen keho reagoi stressiin käynnistämällä monimutkaisen vasteiden sarjan, jota kutsutaan ”taistele tai pakene” -reaktioksi. Reaktio aiheuttaa ihmisen kehossa monenlaisia muutoksia. Siinä sympaattinen hermojärjestelmä nostaa sydämen sykettä, lisää hengitystheyttä, kohottaa verenpainetta, laajentaa silmän pupilleja ja nostaa verensoke-

ria. Adrenokortikotropiinihormonin vapautuminen stimuloi kortisolin erittymistä verenkiertoon, mikä säätelee verensokeritasoja. (Nolen-Hoeksema *et al.*, 2009).

2.3. Stressinhallinta

Nolen-Hoekseman ja muiden (2009) mukaan stressiä aiheuttavien tilanteiden luomat tunteet ja fysiologinen kiihtymystila ovat erittäin epämiellyttäviä, mikä motivoi ihmisiä tekemään jotain tilanteen muuttamiseksi. Ihmiset yrittävät erilaisia selviytymiskeinoja (coping) käyttäen hallita stressaavia tilanteita. Selviytymiskeinot voidaan karkeasti jakaa ongelmiin keskittyviin ja tunteisiin keskittyviin selviytymiskeinoin (Kring *et al.*, 2010; Nolen-Hoeksema *et al.*, 2009).

Ongelmiin keskittyvät selviytymiskeinot tähtäävät stressiä aiheuttavan ongelman ratkaisemiseen. Näitä keinoja käyttävä henkilö saattaisi esimerkiksi säädellä ison projektin aiheuttamaa stressiä jakamalla tehtävän pienempiin osaprojekteihin ja suunnittelemalla aikataulun, jota noudattaen projekti saadaan ajoissa vietyä päätökseen. Tunteisiin keskittyvät selviytymiskeinot taas tähtäävät stressin aiheuttamien negatiivisten tunnereaktioiden vähentämiseen. Näitä keinoja käyttävät henkilöt saattaisivat reagoida stressaaviin tilanteisiin vetäytymällä niistä ja keskittymällä johonkin toiseen toimintaan tai tekemällä jotain rentouttavaa, kuten kuuntelemalla musiikkia. (Kring *et al.*, 2010; Nolen-Hoeksema *et al.*, 2009).

Nolen-Hoekseman ja muiden (2009) mukaan ihmiset voivat myös opetella erilaisia stressinhallintakeinoja stressin mieleen ja kehoon liittyvien negatiivisten vaikutusten vähentämiseksi. Stressinhallintakeinoja on paljon erilaisia. Kring ja muut (2010) jakavat keinot rentoutusharjoituksiin, uskomusrakennelmien muuttamiseen tähtääviin kognitiivisiin uudelleenjärjestelyihin, käyttäytymisen muuttamiseen tähtääviin harjoituksiin ja ympäristön olosuhteita muuttaviin lähestymistapoihin. Muita keinoja ovat lisäksi erilaiset biopalautteeseen liittyvät harjoitukset, joissa ihmiset saavat tietoa fysiologisesta tilastaan erilaisten mittareiden avulla ja stressin sietokykyä parantavat fyysistä kuntoa lisäävät harjoitukset (Nolen-Hoeksema *et al.*, 2009).

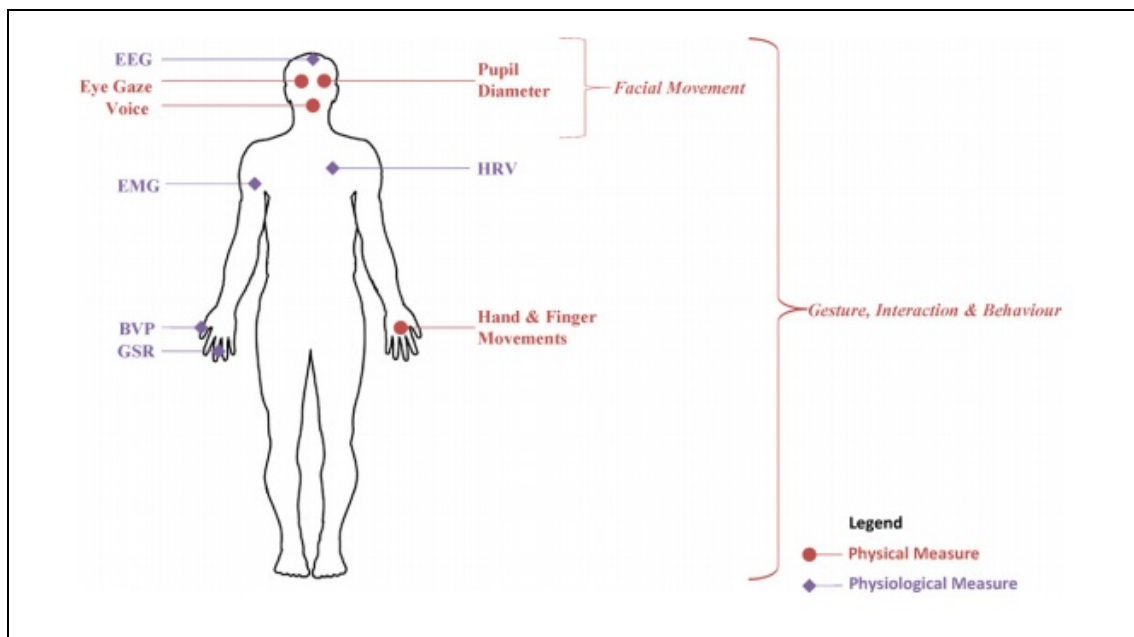
3. Stressin tunnistaminen

Stressin tunnistaminen edellyttää sellaisten mittausten tekemistä, joilla voidaan arvioida stressitasoa. Perinteisesti stressiä on mitattu siten, että stressitasoa on arvioitu jonkin asteikon mukaan. Arviot ovat voineet olla ihmisen itsestään tekemiä itsearviointeja tai ulkopuolisen tarkkailijan havaintojen perusteella tekemiä arvioita. Arviot ovat molemmissa tapauksissa olleet subjektiivisia, eli havaitisijasta riippuvaisia. Yleisesti on kuitenkin todettu itsearviointina tapah-

tuvan arvioinnin olevan hyvä stressitason mittari. Perinteiset tavat mitata stressiä vaativat kuitenkin käyttäytymistä havainnoivan ja analysoivan ihmisen merkittävää osallistumista. (Sharma & Gedeon, 2012).

Stressiä voidaan mitata myös hyödyntämällä eri sensorien avulla saatuja objektiivisia mittauksia, joita on analysoitu erilaisilla laskennallisilla menetelmillä (Sharma & Gedeon, 2012). Kehon toimintoja mittaamalla vahvistettujen tunnereaktioiden tutkiminen on tärkeää silloin, kun itsearviointit eivät ole luotettavia tai niitä ei ole mahdollista tehdä (Purves *et al.*, 2013). Kun perinteisiä subjektiivisia arviointimenetelmiä voidaan käyttää, niin niillä voidaan varmentaa sensoreiden avulla saatua tietoa stressitasosta (Sharma & Gedeon, 2012).

Stressin mittaamiseen käytettävät signaalit voidaan jakaa fyysisiin ja fysiologisiin mittauksiin (Sharma & Gedeon, 2012; 2013). Kuvassa 1 on esitetty yleisimmät stressin mittaamiseen käytetyt fyysiset ja fysiologiset mittaukset, sekä tyypilliset mittauskohdat. Taulukkoon 1 on koottu eri fysiologisissa mittauksista käytetyt lyhenteet, joita käydään tarkemmin läpi myöhemmin tässä luvussa.



Kuva 1. Yleisimmät fyysiset ja fysiologiset mittaukset, joita käytetään stressin havaitsemisessa. Hahmossa on esitetty tavalliset mittauskohdat. (Sharma & Gedeon, 2012).

Fyysisillä signaaleilla tarkoitetaan ihmiskehon muutoksia, jotka voidaan todeta katseella ilman laitteita tai havaintovälineitä. Tällaisia signaaleja ovat katseenseuranta, silmien räpyttely ja silmän pupillin laajeneminen sekä ääneen ja kasvojen ilmeisiin liittyvät signaalit. Fysiologisilla signaaleilla tarkoitetaan ihmiskehon muutoksia, joiden havaitsemiseen tarvitaan erilaisten sensoreiden kehosta keräämää tietoa. (Sharma & Gedeon, 2012; 2013).

Tämän tutkielman tarkoituksena on keskittyä erityisesti fysiologisiin signaaleihin ja niiden pohjalta tapahtuvaan stressin tunnistamiseen. Tässä luvussa käsitellään ensin yleisesti stressin tunnistamista ja esitellään siihen käytettyjä fysiologisia signaaleja. Tämän jälkeen tarkastellaan lähemmin eri signaaleja ja niiden käyttöä stressitason mittaamisessa.

3.1. Stressin tunnistaminen ja fysiologiset signaalit

Stressiä aiheuttavat tilanteet saavat aikaan muutoksia autonomisessa hermostossa (Barreto *et al.*, 2007; Hernandez *et al.*, 2011; Giakoumis *et al.*, 2013; Sharma & Gedeon, 2012; 2013). Giakoumisin ja muiden (2013) mukaan fysiologiset signaalit pystyvät jäljittämään näitä tunteiden autonomisessa hermostossa aikaansaamia muutoksia ja toimivat luotettavina mittareina automaattisessa tunteiden ja stressin tunnistamisessa.

Autonominen hermosto koostuu parasympaattisesta ja sympaattisesta hermostosta. Nämä autonomisen hermoston osat ovat itsenäisiä ja toisiaan täydentäviä, ja ne vastaavat monista sisäelinten toiminnoista (Purves *et al.*, 2013). Sympaattinen hermosto liittyy ”taistele tai pakene” -reaktioon, kun taas parasympaattinen hermosto säätelee lepoon ja ruoansulatukseen liittyviä toimintoja (Purves *et al.*, 2013). Stressaavassa tilanteessa sympaattisen hermoston aktiivisuus kasvaa ja parasympaattisen vähenee. Sympaattinen ja parasympaattinen hermosto säätelevät myös ihon sähkönjohtavuutta, sydämen toimintaa ja aivojen toimintaa. Nämä ovat kolme keskeisintä stressin mittaamiseen liittyvää fysiologista signaalia. (Sharma & Gedeon, 2012).

Stressin oireet vaihtelevat ajan mukaan ja siksi on luotettavan stressintunnistuksen vuoksi tärkeätä tallentaa fysiologisia signaaleja jatkuvasti. Näin voidaan hahmottaa stressitasossa tapahtuvia muutoksia ja suuntauksia (Sharma & Gedeon, 2012).

Taulukossa 1 on esitetty stressin mittaamisessa käytettyjen fysiologisten signaalien yleisesti käytetyt englanninkieliset lyhenteet ja nimet sekä mitattava suure ja yleisin mittauskohta. Yleisimmät ja keskeisimmät stressin mittaamiseen käytetyt fysiologiset signaalit ovat ihon sähkönjohtavuus (EDA/ GSR/ SC), sydämen sykkeen vaihtelu (HR/ HRV) ja aivojen sähköinen toiminta (EEG) (Sharma & Gedeon, 2012). Sharman ja Gedeonin (2012) mukaan nämä signaalit ovat luotettavia käytettäessä myös yksittäin.

Keskeisimpien fysiologisten signaalien lisäksi stressin mittaamiseen voidaan käyttää täydentäviä signaaleja, kuten verenpainetta (BP), veren määrää kudoksessa (BVP), lihasten sähköistä toimintaa (EMG), ihon lämpötilaa (ST) ja hengitystiheyttä (Sharma & Gedeon, 2012). Näitä mittauksia ei voi käyttää yksinään, koska stressin lisäksi voi olla muitakin tekijöitä, jotka vaikuttavat niihin (Sharma & Gedeon, 2012). Useiden mittautapojen yhdistämistä on myös tyy-

pillisesti käytetty parantamaan stressin tunnistamisen tarkkuutta (Hernandez *et al.*, 2011; Sharma & Gedeon, 2012).

Lyhenne	Nimi	Mittaus suure	Mittauskohta
EDA/ GSR/ SC	Galvanic skin response / Electrodermal activity / Skin conductance	Ihon sähkönjohtavuus	Käsi, sormet
EEG	Electroencephalography	Aivojen sähköinen toiminta	Pää
ECG	Electrocardiogram	Sydämen syke (HR) / sykevälivaihtelu (HRV)	Rintakehä, raajat
BP	Blood pressure	Verenpaine	Käsivarsi, sormi
BVP	Blood volume pulse	Sydämen syke (HR) / sykevälivaihtelu (HRV)	Sormi
EMG	Electromyogram	Lihasten sähköinen toiminta	Iho lihaksen päällä
ST	Skin temperature	Ihon lämpötila	Iho
R	Respiration	Hengitystiheys	Rintakehä

Taulukko 1. Stressin mittaamisessa käytettyjen fysiologisten signaalien yleisesti käytetyt englanninkieliset lyhenteet ja nimet sekä mitattava suure ja yleisin mittauskohta.

Seuraavaksi käsitellään tarkemmin erilaisia stressitason mittaamisessa käytettyjä fysiologisia signaaleja. Aluksi käydään läpi kolme keskeisintä signaalia ja lopuksi täydentävät signaalit.

3.2. Ihon sähkönjohtavuus

Ihon sähkönjohtavuuden mittaaminen on paljon käytetty ja luotettava keino stressin tunnistamisessa (Sharma & Gedeon, 2012; Chittaro & Sioni, 2014). Ihmisen vireystilan kohotessa hänen kätensä tulevat kosteiksi, mikä johtuu ihon pinnalla olevien hikirauhasten erityksen lisääntymisestä (Barreto *et al.*, 2007). Monista muista kehon toiminnoista poiketen hikirauhasten toimintaa säätelee vain sympaattinen hermojärjestelmä, joka toimii erityisesti hätä- ja stressitilanteissa (Chittaro & Sioni, 2014). Tämän vuoksi ihon sähkönjohtavuuden mittaaminen antaa luotettavaa tietoa vireystilan muutoksesta ja stressitasosta.

Ihon kostuessa sen sähkönjohtavuus lisääntyy, mitä voidaan mitata johtamalla pieni sähkövirta kahden ihon pinnalle sijoitetun elektrodin läpi (Barreto *et al.*, 2007; Sharma & Gedeon, 2012; Chittaro & Sioni, 2014). Ihon sähkönjohta-

vuoden mittaaminen on varsin yksinkertainen ja mitattavaa vähän rasittava mittaustapa. Elektrodit sijoitetaan tyypillisesti käden etu- ja keskisormiin, eikä toimenpide vaadi mitään erityisiä etukäteisvalmisteluja (esim. käsien pesu riittää) ennen mittaamista (Sharma & Gedeon, 2012; Chittaro & Sioni, 2014).

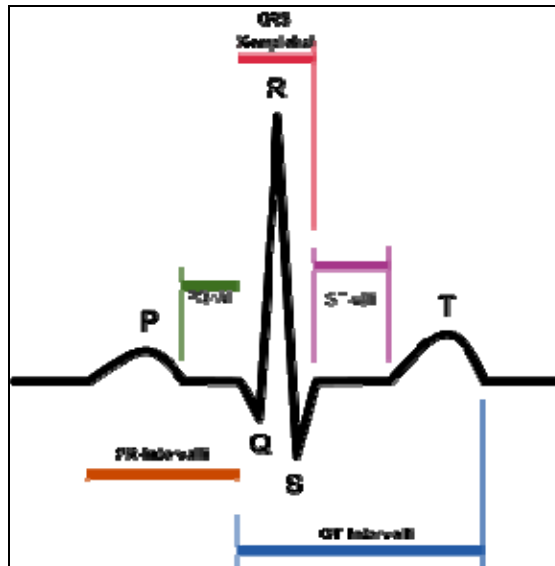
Stressin aiheuttama hikoilu saa aikaan nopean nousun ihon sähkönjohtavuudessa, mikä voidaan mitata jo sekunnin kuluttua stressaavasta tapahtumasta (Chittaro & Sioni, 2014). Stressaavan ärsykkeen lakattua sähkönjohtavuus laskee ihmisen perustasolle hitaasti noin neljässä sekunnissa (Chittaro & Sioni, 2014). Jokaisella ihmisellä on oma yksilöllinen sähkönjohtavuuden perustasonsa, joka tulee olla selvillä ennen kuin muutoksia stressitasossa voidaan mitata (Chittaro & Sioni, 2014). Yksilöllinen perustaso tulee ottaa huomioon silloin, kun verrataan eri ihmisten ihon sähkönjohtavuuden mittaustuloksia toisiinsa (Hernandez *et al.*, 2011).

3.3. Sydämen toiminta

Sydämen sykevälivaihtelun mittaaminen on paljon käytetty mittaamenetelmä verenkierron tilojen ja autonomisen hermoston toiminnan tutkimiseen sekä toinen luotettava mittaamenetelmä stressin tunnistamiseen (Sharma & Gedeon, 2012). Tihentynyt sydämen syke liitetään yleisesti tunnetilojen aktivoitumiseen ja sitä on käytetty kiihtymyksen ja stressin mittarina (Chittaro & Sioni, 2014). Sydämen sykevälivaihtelun kyky ilmentää muuttuvaa ja kasaantuvaa räsitystä tekee siitä hyvän mittarin stressille (Sharma & Gedeon, 2012).

Elektrogardiogrammi eli EKG on erittäin herkkä sydämenlyönneille ja ylivoimaisesti paras sydämen sykevälivaihtelun mittari (Sharma & Gedeon, 2012). Siinä sydämen lihasten sähköinen toiminta esitetään graafisesti, kuten kuvan 2 esimerkissä. Esitys kuvaa sähköimpulssin kulkua ja jännitteen voimakkuutta (Sharma & Gedeon, 2012; 2013). Sydämen kammioiden supistumista kuvaavan QRS aallon R piikistä voidaan laskea sydämen sykevälivaihtelu (Sharma & Gedeon, 2012; 2013).

EKG:ia otettaessa ihmisen rintaan iholle sydämen kohdalle laitetaan useita elektrodeja, mikä voi käyttäjistä tuntua epämiellyttävältä ja vaatii etukäteisvalmisteluja (Chittaro & Sioni, 2014). EKG-laitteistot ovat yleensä myös varsin suuria ja niitä on vaikea kuljettaa mukana (Sharma & Gedeon, 2012). Sydämen sykevälivaihtelun mittaamiseen voi käyttää myös sormeen laitettavaa veren määrää kudoksessa (ks. alakohta 3.1.4) mittaavaa laitetta, joka on käyttäjälle helpompi käyttää, mutta ei niin luotettava mittari kuin EKG (Chittaro & Sioni, 2014).



Kuva 2. Yhden sydämenlyönnin graafinen esitys EKG:ssa. (Wikipedia).

Sydämen toiminnan mittauksista saatuja tuloksia ei voi suoraan käyttää eri ihmisten välisen stressitason vertailuun ilman mittausten standardointia mittaamalla ihmisten sydämen toiminnan yksilöllisiä perustasoja. Sydämen toiminnan perustaso riippuu yksilön sydämen ja verenkiertoelimistön kunnosta, sekä siitä toiminnasta, jota hän on juuri tekemässä. (Sharma & Gedeon, 2012).

3.4. Aivotoiminta

Aivotoiminnan ja stressin välillä on yhteys. Aivotoimintaa voidaan analysoida eri menetelmin, esimerkiksi toiminnallisella magneettikuvauksella (fMRI), positroniemissiotomografialla (PET) ja aivosähkökäyrällä (EEG). EEG on yleisimmin käytetty, koska sen ajallinen erotuskyky on hyvä, se on tutkittavan kannalta vähemmän tunkeutuva ja muihin menetelmiin verrattuna edullinen. (Sharma & Gedeon, 2012).

EEG nauhoitukset mittaavat sähköisiä aivoaaltoja, jotka voidaan havaita ulkoisesti kallon pinnalta (Purves *et al.*, 2013; Sharma & Gedeon, 2012). EEG-mittaukset vaativat enemmän etukäteisvalmisteluja ja aikaa, kuin ihon sähkönsäätövoiteen tai sydämen toimintaan liittyvät stressimittaukset. Niissä päähän ihon pinnalle kiinnitetään elektrodeja, joiden lukumäärä voi vaihdella muutamasta jopa 256:een (Purves *et al.*, 2013). Elektrodit ovat yleensä kiinnitetty päähän sovitettavaan ja sen muotoon mukautuvaan huppuun, jonka sisälle saatetaan lisäksi lisätä geeliä sähkönsäätövoiteen parantamiseksi (Purves *et al.*, 2013). EEG-mittauksia on mahdollista tehdä myös vähemmän tunkeutuvilla ja helpommin käytettävillä laitteilla, kuten kuluttajille suunnatulla edullisella ja langattomalla Emotiv EPOC -laitteella. Näissä laitteissa on vähemmän elektrodeja ja ne eivät ole niin tarkkoja, kuin perinteiset EEG-laitteistot. (Sharma & Gedeon, 2013).

Purvesin ja muiden (2013) mukaan-EEG jännitteen taajuusvaihtelut sijoittuvat 1 Hz:n ja 100 Hz:n välille ja jännitteen mukaan signaalit tyypillisesti luokitellaan delta-, theta-, alfa-, beta- ja gamma-aalloiksi. Beta-aaltojen esiintyminen afa-aaltojen taajuuksien laskiessa viittaa stressin esiintymiseen (Sharma & Gedeon, 2012).

EEG-signaalit antaa muihin mittausmenetelmiin verrattuna enemmän tietoa stressistä ja erityisesti rentoutumisen asteesta. Aivotoiminnan käyttö stressin tunnistamisessa vaatii kuitenkin vielä lisää tutkimusta. (Sharma & Gedeon, 2012).

3.5. Muut fysiologiset mittaukset

Stressin tunnistamiseen voidaan käyttää myös muita fysiologisia mittauksia, kuten verenpaine, veren määrä, lihasten elektromyografia, ihon lämpötila ja hengitystiheys. Näitä mittauksia ei voi käyttää yksinään, koska stressin lisäksi voi olla muitakin tekijöitä, jotka vaikuttavat niihin (Sharma & Gedeon, 2012).

Verenpaineen kohoamisen on todettu liittyvän stressin määrän lisääntymiseen. Mittaaminen tapahtuu yleensä käsivarren ympäri käärityn mansetin avulla. Mittaukset voidaan kokea häiritseviksi. Verenpaineen mittaamiseen on olemassa myös vähemmän häiritseviä sormen ympärille kierrettäviä mansetteja. (Sharma & Gedeon, 2012).

Veren määrä kudoksessa (BVP, Blood volume pulse) mittaa määrätyllä aikavälillä kudoksessa esiintyneen veren määrää. Mittaus tehdään tutkimalla ihon pinnalta heijastuvan valon määrää sormenpään asennettavalla mittauslaitteella. Veren määrän vähenemisen kudoksessa on todettu olevan yhteydessä stressin lisääntymiseen. (Sharma & Gedeon, 2012).

Lihasten elektromyografia kertoo aktiivisten lihasten sähköisestä toiminnasta. Stressin lisääntymistä ilmentämään on käytetty olkapään trapeziuslihaksen toiminnan kasvua. (Sharma & Gedeon, 2012). Kasvojen lihaksien aktiivisuuden mittaamista, kuten posken zygomaticus major ja otsan corrugator supercilii, on käytetty erottamaan positiivisia ja stressiin viittaavia negatiivisia tunnetiloja toisistaan (Chittaro & Sioni, 2014).

Ihon lämpötilan on todettu kasvavan stressin vähentyessä ja vastaavasti lämpötilan lasku on liittynyt stressin lisääntymiseen. Mittaukset on tehty sormen pään asetettavan anturin avulla. (Sharma & Gedeon, 2012).

Hengitystiheyden ja hengityksen volyymin mittausta on myös käytetty yhdessä toisten mittaustapojen kanssa (Sharma & Gedeon, 2012). Useimmissa hengitystä mittaavissa järjestelmissä käytetään rinnan ympäri kierrettyä vyötä. Jotkut voivat kokea vyön häiritseväksi tai normaalia toimintaa häiritsevänä. (Sanches *et al.*, 2010; Sharma & Gedeon, 2012).

4. Stressin hallintaa tukevat järjestelmät

Tutkielman lähdeaineisto hankittiin tekemällä avainsanoihin perustuneita hakuja neljään eri tietokantaan. Käytetyt tietokannat olivat ACM Digital Library, SpringerLink, ScienceDirect ja IEEE Xplore. Hakujen avulla löydettiin seitsemän eri stressin hallintaa tukevaa järjestelmää, jotka käyttivät fysiologisia signaaleja stressin tunnistamisessa. Taulukossa 2 on esitetty löydetty järjestelmät, artikkelin julkaisuvuosi, järjestelmien stressin tunnistamiseen käyttämät fysiologiset signaalit ja järjestelmän käyttötiheys.

Järjestelmän nimi	Artikkelin julkaisuvuosi	Fysiologiset signaalit	Käyttötiheys
Aequorin	2009	HR	Päivän lopuksi
Affective Health	2010	SC, HRV	Useita kertoja päivässä
AutoEmotive	2014	EDA, ST, HR, HRV, R	Jatkuva mittaus
MoodWings	2013	EDA, ECG	Jatkuva mittaus
Relaxation training	2014	SC, HR, EMG	Harjoittelutilanteet
StressEraser	2006	HR	Useita kertoja päivässä
Wristband	2014	EEG	Harjoittelutilanteet

Taulukko 2. Stressin hallintaa tukevat järjestelmät, artikkelin julkaisuvuosi, järjestelmien stressin tunnistamiseen käyttämät fysiologiset signaalit ja järjestelmän käyttötiheys.

Tässä luvussa esitellään ensin löydettyjen järjestelmien kuvaukset ja sitten vertaillaan niitä.

4.1. Järjestelmien kuvaukset

Tokuhisan (2009) stressin vähentämiseen tähtäävä järjestelmä Aequorin perustuu siihen, että päivän aikana käyttäjältä tallennetaan sydämen syke korvanipukkaan kiinnitetyllä sensorilla. Päivän päättyessä ja kotiin palattaessa istutaan järjestelmään kuuluvaan keinutuoliin, jolloin saadaan mukana kuljetettavalta laitteelta purettua tallennetut tiedot ja palaute. Keinutuolin yhteydessä on mahdollista matalataajuisen äänen ja led-valojen kautta saada palaute päivän stressitilanteesta samalla, kun katsoo näytöltä aikakoodattuja mittaustuloksia. Järjestelmän tavoitteena on tarjota ihmisille mahdollisuus stressin tunnistamiseen ja sitä kautta sen hallintaa. Tokuhisan (2009) mukaan järjestelmän heikkoutena on se, että stressin lisäksi sydämen sykkeeseen vaikuttaa myös muu fyysinen suoriutuminen.

Affective Health on jokapäiväiseen käyttöön tarkoitettu biopalautteeseen perustuva stressinhallinnan mobiilipalvelu, jonka kautta käyttäjät voivat tar-

kastella omia positiivisia ja negatiivisia käyttäytymistottumuksia. Palvelun tavoitteena on esittää stressireaktiot biopalautteena ilman tulkintaa, jolloin käyttäjät voivat itse arvioida tilannettaan tiedon pohjalta. Kyseessä on ihon sähkönsäilyttävyyttä, sydämen sykettä ja kiihtyvyyttä mittaava ranneke, joka on yhteydessä mobiililaitteeseen ja jota käytetään sovelluksen kautta. Sovellus näyttää visuaalisen esityksen mittaushetken arvoista spiraalikuvion keskellä ja mittaushistoriaa voi seurata spiraalin reunoja kohti. Mittaushetken arvojen näyttäminen mahdollistaa interaktiivisen biopalautekehän, jossa voi havainnoida esimerkiksi oman hengityksen vaikutusta stressitasoon. Mittaushistorian tarkastelu mahdollistaa kehityksen seuraamisen pitkällä aikavälillä. (Sanches *et al.*, 2010).

AutoEmotive on Hernandezin ja muiden (2014) esittelemä suunnitelma menetelmistä, joilla voidaan tukea autoa ajavan stressinhallintaa. Auton hallintalaitteisiin liitettyjen sensoreiden kautta saatujen fysiologisten mittausten (esim. EDA, ST) perusteella tunnistettu stressi saa aikaan auton säätöjen mukautumisen siten, että se tukee ajajan stressin hallintaa. Auton musiikkijärjestelmä säätelee stressitason noustessa musiikkia rauhallisemmaksi ja hiljaisemmaksi, navigaatiojärjestelmän ääni säädetään vastaamaan ajajan tunnetilaa, auton lämpötilaa lasketaan stressitason noustessa ja auton kojelaudan kautta annetaan värivaioilla biopalautetta. (Hernandez *et al.*, 2014).

MacLeanin ja muiden (2013) MoodWings on biopalautteeseen perustuva järjestelmä, jossa käyttäjän reaaliaikaista stressitilaa heijastetaan puettavan, esimerkiksi ranteeseen kiinnitetyn, perhosen siipien liikkeen kautta. Korkea stressitaso saa aikaan ison siipien liikkeen ja pieni vain siipien värinää. Siipien liikkeen nopeus pysyy vakiona. Järjestelmän tavoitteena on varoittaa alkavasta stressistä ja tarjota fyysinen käyttöliittymä, jonka avulla käyttäjä voi manipuloida tunnetilaansa. Stressitasoa mitattiin ihon sähkönsäilyttävyyden avulla jalkapohjasta ja EKG:n avulla molemmista käsivarsista. Järjestelmän vaikutusta testattiin ajosimulaattorin avulla. Testeissä MoodWingsin todettiin mittaavan hyvin stressiä ja käytön todettiin korreloivan turvallisen ajon kanssa, mutta lisäävän sekä mitattua että koettua stressiä. Lisäksi testeissä kävi ilmi, että ihmiset eivät halua muiden näkevän tunnetilaansa. (MacLean *et al.*, 2013).

Chittaron ja Sionin (2014) Relaxation training on sovellus, joka havainnoi käyttäjää fysiologisten sensorien kautta ja tarjoaa hänelle tarkkaa tietoa hänen havaitusta tunnetilastaan. Käyttäjän stressitason mittaamiseen käytettiin kahta tapaa ja verrattiin näiden kykyä tunnistaa stressiä toisiinsa ja plasebomittaukseen. Ensimmäisessä testissä mitattiin vain ihon sähkönsäilyttävyyttä ja toisessa sen lisäksi myös sydämen sykettä ja kasvojen lihasten sähköistä toimintaa. Plasebomittauksessa käyttäjälle annettiin palautteena satunnaisesti arvotut

mittaustulokset, jotka perustuivat aiemmin testin tehneiden käyttäjien mittaus-tuloksiin.

Relaxation training -sovellus on toteutettu pelinä, jossa biopalauteena esite-tään käyttäjän havaittu stressitaso näytön kautta pelattavan pelin kolmiulottei-sen virtuaalisen hahmon tunnetilan ja käyttäytymisen kautta. Pelin hahmo näy-tetään virtuaalisessa ympäristössä, kuten koulussa tai juna-asemalla, suoritta-massa erilaisia tehtäviä. Joka ympäristössä hahmo kohtaa erilaisia stressiä ai-heuttavia tilanteita ja käyttäjän tulee pitää yllä keskittynyttä ja rentoutunutta tilaa, joka mahdollistaa virtuaalisen hahmon onnistumisen kyseisessä tehtävä-sä. Mikäli käyttäjän stressitaso alkaa nousta, hahmon toiminta alkaa hidastua ja käyttäjän lisääntyneitä stressitasoa ilmennetään myös hahmon kasvonilmeiden kautta. Mikäli käyttäjä ei kykene rauhoittumaan ja stressitason nousu jatkuu, niin hahmo saattaa pysähtyä kokonaan ja tehtävän suorittaminen keskeytyy. Pelin kautta toteutetun biopalaute-prosessin kautta käyttäjälle tarjotaan mahdollisuus ajan ja harjoittelun myötä oppia muuttamaan fysiologista toimintaan-sa, sekä parantaa terveyttään ja suoritustaan. Tutkimuksessa todettiin, että pel-källä sähkönsäätövoiman mittauksella saavutettiin parempi tarkkuus stressita-son havaitsemisessa kuin muilla, mutta yllättäen plasebon ja monen mittauksen menetelmän välillä ei ollut niin suurta eroa. (Chittaro & Sioni, 2014).

StressEraser on kuluttajille suunnattu pieni kämmenen kokoinen biopalauteeseen perustuva laite, jonka tarkoituksena on auttaa käyttäjää havainnoimaan ja laskemaan stressitasoaan ohjatun harjoituksen kautta. Käyttö on helppoa ja nopeaa. Laitteen anturiin laitetusta sormesta mitataan pulssioksimetrin avulla sydämen syke, joka sitten esitetään graafisena esityksenä laitteen näytöltä. Laite antaa visuaalisia ja äänimerkkiin perustuvia vihjeitä, milloin käyttäjän tulisi hengittää syvään ja kuinka pitkä hengityksen tulisi olla. Laitteen tavoitteena on ohjata käyttäjää keskittymään hengitykseensä, sekä parantamaan hengitystek-niikkaansa ja näin laskemaan stressitasoaan. Laitetta on tarkoitus käyttää useita kertoja päivässä. (Moore, 2006).

Wristband-ranneke on kehitysvaiheessa oleva suunnitelma neuropalauttee-seen ja aivokäyttöliittymään perustuvasta laitteesta, jonka avulla ihmiset voivat säädellä tunnetilojaan tehokkaasti stressaavissa tilanteissa. Stressitason mit-taukset tehdään EEG-signaaleista päähän asetettavalla Emotiv EPOC -laitteella ja palaute esitetään rannekkeeseen liitettyjen eriväristen led-valojen avulla. EEG-signaalien etuna on nopea palaute ja oman toiminnan vaikutusten välitön havaitseminen rannekkeen kautta. Laite soveltuu stressinhallinnan harjoitte-luun. (Hao *et al.*, 2014)

4.2. Yhtenäisyydet ja erot

Stressinhallintaa tukevia järjestelmiä on tutkittu ja kehitetty varsin vähän ja vähän aikaa. Seitsemästä löydetystä artikkelista vanhin oli julkaistu vuonna 2006 ja noin puolet oli julkaistu viimeisen vuoden sisällä. Tänä aikana järjestelmien kehitys on ollut nopeaa erityisesti stressin tunnistamiseen ja siinä käytettyihin fysiologisiin signaaleihin liittyen. Stressin tunnistaminen on kehittynyt luotettavammaksi. Vanhimpien, Aequorin ja StressErasorin, ongelmana on stressin erottaminen muusta fyysisestä sydämen sykettä nostavasta toiminnasta. Uudemmissa järjestelmissä tähän on pyritty varautumaan yhdistämällä useita eri fysiologisia mittauksia tai käyttämällä esimerkiksi kiihtyvyysanturia fyysistä toimintaa osoittamaan kuten Affective Healthissa on tehty.

Aivotoiminnan mittaamiseen perustuvaa Wristbandia lukuun ottamatta kaikki muut järjestelmät käyttävät stressin tunnistamiseen sydämen sykettä. Lisäksi sydämen sykettä käyttäneissä järjestelmissä, kahta vanhinta lukuun ottamatta, käytetään sykkeen lisäksi ainakin ihon sähkönjohtavuuden mittaamista. Käytettyjen mittaustapojen suosio selittyy sillä, että sydämen syke ja ihon sähkönjohtavuus ovat kummatkin myös yksinään luotettavia stressin mittaamisessa ja signaalien mittaaminen häiritsee käyttäjää vain vähän (Sharma & Gedeon, 2012).

Myös mittauslaitteistoissa voi löytää eroja eri järjestelmien välillä. Erityisesti uudemmat järjestelmät ovat helpompia käyttää, kevyempiä ja mittausjärjestelyiltään vähemmän tunkeutuvia tai häiritseviä. Esimerkiksi Aequorin mitalaite kiinnitetään johdolla korvannipukkaan, ja se vaatii toimiakseen vahvistimen ja mobiililaitteen. Lisäksi laitteen tieto puretaan päivän päättyessä toiseen laitteeseen. Affective Healthin mittausanturit on integroitu rannekkeeseen ja on langattomasti yhteydessä käyttäjän mobiililaitteeseen, jonka sovelluksen kautta tieto on heti käytettävissä.

Järjestelmät eroavat toisistaan myös käyttötarkoituksen perusteella. Suurin osa järjestelmistä on suunniteltu päivittäin tavallisissa arjen tilanteissa käytettäväksi. Toiset järjestelmät, kuten Relaxation training ja Wristband, taas soveltuvat paremmin käytettäväksi erilaisissa harjoittelutilanteissa mittauslaitteiden ja muiden järjestelmään liittyvien laitteiden kuljettamiseen liittyvien rajoitusten vuoksi.

Aequorin ja Affective Health keräävät käyttäjältä tietoa koko päivän ajan ja tallentavat sitä. Tämä on hyödyllistä sen vuoksi, että se tarjoaa käyttäjälle mahdollisuuden tarkastella ja arvioida stressitasoaan ja siihen vaikuttavia asioita pidemmällä aikavälillä. Affective Health, AutoEmotive, MoodWings ja Wristband keräävät käyttäjältä tietoa jatkuvasti ja näyttävät tietoa reaaliaikaisesti. Tämä taas tukee välittömän palautekehän käyttämistä stressinhallinnassa.

Relaxation training kerää tietoa reaaliaikaisesti, mutta ainoastaan mittaustilanteessa ja StressEraser taas edellyttää, että käyttäjä tekee itse mittaukset.

Järjestelmät eroavat paljon myös antamansa palautteen mukaan. Erilaisia värivaloja palautteen annoissa käyttivät Aquorin, AutoEmotive ja Wristband. Stressitasoa tai käytettyä signaalia kuvaavaa graafista esitystä käyttivät Affective Health ja StressEraser. Moodwings kuvasi stressitasoa fyysisen perhosen siipien liikkeiden kautta ja Relaxation training kolmiulotteisen virtuaalisen hahmon käyttäytymisen ja ilmeiden kautta.

AutoEmotive erosi kaikista muista siinä, että palautteen lisäksi järjestelmä sääteli auton toimintoja siten, että ne mukautuivat käyttäjän stressitason mukaisesti.

5. Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin fysiologisten signaalien pohjalta tapahtuvaa stressin tunnistamista ja stressin hallintaa tukevia järjestelmiä aiheeseen liittyvän aiemman tutkimuksen kautta. Käsittelemättä on jätetty fysiologisten signaalien analysoinnissa käytettävät laskennalliset tekniikat, jotka osaltaan mahdollistavat stressin havaitsemisen ja tunnistamisen. Stressin ja tunteiden tunnistamisen liittyvää tutkimusta on kyllä tehty, mutta stressin hallintaa tukevia järjestelmiä on tutkittu vähän. Järjestelmät ovat kuitenkin kehittyneet nopeasti erityisesti stressin tunnistamisen osalta mittaussuomenkielisen monipuolistuessa ja tullessa halvemmiksi.

Fysiologiset signaalit pystyvät jäljittämään tunteiden autonomisessa hermostossa aikaansaamia muutoksia ja voivat näin toimia luotettavina mittareina stressin tunnistamisessa. Mittaukset ovat kehittyneet luotettavimmiksi, kun on otettu käyttöön uusia mitattavia signaaleja ja menetelmiä. Tosin Chittaron ja Sionin (2014) tutkimus osoittaa, että eri menetelmiä vertailevaa kokeellista tutkimusta olisi hyvä tehdä enemmän. Mittaamisessa isona tulevaisuuden haasteena on kuitenkin tehdä siitä käyttäjän kannalta helpompaa ja vähemmän häiritsevää.

Tutkielmassa käsitellyistä järjestelmistä kaikkien perustana oli antaa käyttäjälle palautetta hänen stressitasostaan. Tämän taustalla on ajatus, että tulevalle tietoisesti stressistä on mahdollista vaikuttaa siihen. Lisäksi biopalaute antaa käyttäjälle mahdollisuuden testata, miten stressitasoon voi vaikuttaa esimerkiksi käytöstään muuttamalla. Osa järjestelmistä antoi myös ohjeita rauhoittumiseen tai ohjasi harjoittelemaan. Yksi järjestelmä esitti lisäksi, että stressinhallintaa voi tukea myös säätelemällä ympäristöä käyttäjän tunnetilan mukaisesti. Järjestelmien todellisia vaikutuksia ihmisten stressinhallintaan ei juurikaan ole tutkittu ja tätä olisikin hyvä jatkossa tutkia enemmän.

Viiteluettelo

Barreto, A., Zhai, J., & Adjouadi, M. (2007). Non-intrusive physiological monitoring for automated stress detection in human-computer interaction. In M. Lew, N. Sebe, T. S. Huang & E. M. Bagger (Eds.), *Human-Computer Interaction* (pp. 29-38).

Chittaro, L., & Sioni, R. (2014). Affective computing vs. affective placebo: Study of a biofeedback-controlled game for relaxation training. *International Journal of Human-Computer Studies*, 72(8-9), 663-673.

Giakoumis, D., Tzovaras, D., & Hassapis, G. (2013). Subject-dependent biosignal features for increased accuracy in psychological stress detection. *International Journal of Human-Computer Studies*, 71(4), 425-439.

Hao, Y., Budd, J., Jackson, M. M., Sati, M., & Soni, S. (2014). A visual feedback design based on a brain-computer interface to assist users regulate their emotional state. In *Proceeding CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '14* (pp. 2491-2496). New York: ACM.

Hernandez, J., McDuff, D., Benavides, X., Amores, J., Maes, P., & Picard, R. (2014). AutoEmotive: bringing empathy to the driving experience to manage stress. In *Proceedings of the 2014 Companion Publication on Designing Interactive Systems, DIS Companion '14* (pp. 53-56). New York: ACM.

Hernandez, J., Morris, R. R., & Picard, R. W. (2011). Call center stress recognition with person-specific models. In S. D'Mello, A. Graesser, B. Schuller & J-C. Martin (Eds.), *Affective Computing and Intelligent Interaction* (125-134). Berlin: Springer-Verlag.

Kring, A. M., Johnson, S. L., Davison, G. C., & Neale, J. M. (2010). *Abnormal psychology*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

MacLean, D., Roseway, A., & Czerwinski, M. (2013). Moodwings: A wearable biofeedback device for real-time stress intervention. In F. Makedon, M. Betke, M. S. El-Nasr, & I. Maglogiannis (Eds.), *Proceedings of the 6th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA '13* (Article No. 66). New York: ACM.

McGrady, A. (2007). Psychophysiological mechanism of stress: A foundation for the stress management therapies. In P. M. Lehrer, R. L. Woolfolk & W. E. Sime (Eds.), *Principles and practice of stress management* (pp. 16-37). New York: The Guilford Press.

Moore S. K. (2006). Calm in your palm: Biofeedback device promises to reduce stress. *IEEE Spectrum* 43(3), 60.

Nolen-Hoeksema, S., Fredrickson, B., Loftus, G. & Wagenaar W. A. (2009). Atkinson & Hilgard's introduction to psychology, 15th ed. Andover: Wadsworth/Cengage Learning.

Purves, D., Cabeza, R., Huettel, S. A., LaBar, K. S., Platt, M. L. & Woldorff, M. G. (2013). Principles of cognitive neuroscience, second edition. Sunderland, MA: Sinauer Associates.

Sanches, P., Höök, K., Vaara, E., Weymann, C., Bylund, M., Ferreira, P., Peira, N. & Sjölander, M. (2010). Mind the body! Designing a mobile stress management application encouraging personal reflection. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems DIS '10* (pp. 47-56). New York: ACM.

Sharma, N. & Gedeon, T. (2012). Objective measures, sensors and computational techniques for stress recognition and classification: A survey. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 108(3), 1287-1301.

Sharma, N. & Gedeon, T. (2013). Modeling stress recognition in typical virtual environments. In *Proceedings of the 7th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare PervasiveHealth '13* (17-24). Brussels, Belgium: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).

Tokuhsa, S. (2009). Aequorin: Design of a system for reduction of the user's stress in one day. In *International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshops ICUMT '09*, 1-6.

Wikipedia. Sydänsähkökäyrä. Haettu 23.11.2014 osoitteesta <http://fi.wikipedia.org/wiki/Sydänsähkökäyrä>.

Zautra, A. J. (2003). *Emotions, stress and health*. New York: Oxford University Press.

Teknostressi organisaatioissa: teknostressin aiheuttajat, ilmenemistavat ja vähentäminen

Birgitta Logrén

Tiivistelmä.

Tietotekniikan kehitys viimevuosina on ollut todella nopeaa. Muutokset ovat tuoneet tullessaan paitsi helpotusta arjen toimenpiteisiin, myös haasteita käyttäjille. Työssä käytettävä tietotekniikka aiheuttaa käyttäjille teknostressiä, eli teknologian aiheuttamia stressin oireita. Organisaatioissa ja työyhteisöissä teknostressi aiheuttaa muun muassa tyytymättömyyttä työhön ja vaikeuksia työssä jaksamisessa. Siksi on tärkeää niin yksilön kuin yhteisönkin kannalta, että teknologian aiheuttamaa stressiä ryhdytään ehkäisemään ajoissa.

Avainsanat ja -sanonnat: teknostressi, stressitekijä, stressireaktio, teknologia-piirteet.

1. Johdanto

Tietotekniikkaa hyödynnetään nykyään lähes kaikessa, niin työssä, harrastuksissa kuin vapaa-ajanvietteenä. Kun esimerkiksi työhön liitetään tietotekniikkaa, työn tekemisen luonne muuttaa muotoaan [Brod, 1984; Ragu-Nathan et al., 2008]. Tietotekniikan jatkuvasti kehittyessä sitä kohtaan on suuria odotuksia; sen odotetaan helpottavan ja tehostavan työntekoa ja säästävän aikaa [Wang et al., 2008]. Työvälineiden tehokkuuden kasvettua työntekijöiltä luonnollisesti odotetaan vastaavaa työtuloksen kasvua. Tehokkuutta ei välttämättä kuitenkaan saavuteta, mikäli järjestelmät eivät toimi odotetulla tavalla. Tällöin tehokkuus toteutuu todellisuudessa työntekijöiden kustannuksella tietotekniikan sijaan. Luonnollisesti tämä aiheuttaa stressin oireita työntekijöiden keskuudessa [Brod, 1984].

Tietotekniikan kehitys ja yleistyminen vaikuttavat ihmisiin monella tavalla. Yksilön ei tarvitse itse käyttää tietotekniikkaa päivittäin kärsiäkseen *teknostressistä*. Teknostressi tarkoittaa "mitä tahansa suoraan tai epäsuorasti teknologiasta johtuvaa negatiivista vaikutusta asenteisiin, ajatuksiin, käyttäytymiseen tai fyysiseen olemukseen" [Weil and Rosen, 1997]. Teknostressin esiintymiseen vaikuttaa työntekijöiden yksilöllisten ominaisuuksien ohella myös muun muassa tietotekniikan monimutkaisuus [Ayyagari et al., 2011; Ragu-Nathan et al., 2008] ja nopeat muutokset [Wang et al., 2008]. Ayyagari ja muut [2011] ovat kuvanneet

eri teknologiapiirteet, jotka vaikuttavat stressitekijöiden syntyyn. Teorian avulla teknostressin tutkimisesta on tullut asteen verran helpompaa.

Tässä tutkielmassa käsittelen teknostressiä organisaatioiden ja työyhteisöjen näkökulmasta. Ensin annan teknostressille tarkemman määritelmän ja sen jälkeen määrittelen, mitä tarkoittavat stressitekijät ja stressireaktiot. Lisäksi määrittelen yksilö-tekniologia -tasapainomallin ja esittelen stressitekijöihin vaikuttavat teknologiapiirteet sekä teknostressin aiheuttajat ja ehkäisijät. Näiden teorioiden pohjalta esittelen teknostressiin liittyviä oireita ja syitä sen esiintymiselle. Pohdin myös tapoja ehkäistä teknostressiä. Lopuksi käsittelen teknostressitutkimuksen tarvetta tulevaisuudessa.

Käytän termiä teknologia tarkoittamaan pääasiassa tietotekniikkaa.

2. Taustaa

Teknostressiä käsittelevissä tutkimuksissa on esitelty erilaisia teorioita aiheen käsittelyä helpottamaan. Nostan tässä luvussa esiin tärkeinä pitämiäni teorioita. Stressitutkimuksissa on yleisesti käytetty ilmiön jaottelua stressitekijöihin ja stressioireisiin. Ayyagari ja muut [2011] ovat määritelleet teknostressitutkimuksia tukevat teknologiapiirteet, jotka ovat vaikuttamassa stressitekijöiden muodostumiseen. Esittelen myös edelliseen liittyvän yksilön ja teknologian välisen yhteensopivuusmallin. Lisäksi käsittelen teknostressiä käyttäen apuna Ragu-Nathanin ja muiden [2008] kehittämää käsittemallia, jossa teknostressiin vaikuttavat tekijät jaetaan teknostressin aiheuttajiin ja ehkäisijöihin. Aluksi annan teknostressille tarkan määritelmän.

2.1. Teknostressin määritelmä

Brod [1984] esitteli ensimmäisenä teknostressin käsitteen ja määritteli sen tarkoittamaan "modernia vaivaa, jota aiheuttaa kyvyttömyys selviytyä alati kehittyvistä teknologioista terveellä tavalla". Kenties eräs yksinkertaisimmista teknostressin määritelmistä on Ragu-Nathanin ja muiden [2008] antama: "teknostressi tarkoittaa loppukäyttäjän kokemaa tieto- ja viestintäteknologiasta johtuvaa stressiä."

Teknostressin yhteydessä puhutaan usein myös teknofobiasta, johon liittyy pelkoa ja ahdistusta teknologiaa kohtaan [ks. Wang et al., 2008] Wang ja muut [2008] määrittelevät teknostressin tarkoittamaan myös "levottomuutta, pelkoa, jännittyneisyyttä ja ahdistuneisuutta opeteltaessa käyttämään ja käytettäessä uutta teknologiaa."

Tässä tutkielmassa teknostressillä tarkoitetaan teknologiasta, erityisesti tietotekniikasta, jollain tavalla aiheutuvia stressin oireita.

2.2. Stressi, stressitekijät ja stressireaktiot

Stressitutkimuksissa lähtökohtana on yleisesti käytetty jakoa stressin syihin ja stressin oireisiin [Ayyagari et al., 2011; Ragu-Nathan et al., 2008]. Koska teknostressi ilmenee hyvin samaan tyyliin kuin muukin stressi [Ayyagari et al., 2011], on ollut luonnollista käyttää tätä jaottelua myös teknostressiin liittyvässä tutkimuskirjallisuudessa.

Ihminen kokee stressiä, jos siihen on jokin yksilöön fyysisesti tai psyykkisesti vaikuttava syy. *Stressitekijät* (engl. stressors) ovat ärsykejä, joihin ihminen reagoi tavalla tai toisella [Ayyagari et al., 2011]. Määritelmänkin mukaan teknostressin aiheuttaa teknologia, joten teknostressin stressitekijät luonnollisesti liittyvät jollain tavalla teknologiaan. Teknostressin kohdalla voitaisiinkin puhua teknostressitekijöistä. Tässä tutkielmassa käytetään kuitenkin yksinkertaisuuden vuoksi termiä stressitekijät.

Ayyagari ja muut [2011] ovat löytäneet kirjallisuudesta viisi varteenotettavaa organisaatioissa ilmenevää stressitekijää: työn ylikuormittavuus (engl. work overload), työroolin monitulkintaisuus (engl. role ambiguity), työn epävarmuus (engl. job insecurity), työn ja kodin välinen ristiriita (engl. work-home conflict) sekä yksityisyyden epäkunnioitus (engl. invasion of privacy). Työn ylikuormittavuutta aiheuttaa liian monen asian yhtäaikainen tekeminen ja useiden teknologioiden yhtäaikainen käyttäminen. Myös teknologian lisääntymisen aiheuttama kasvanut tehokkuusvaatimus aiheuttaa ylikuormitusta. Työroolin monitulkintaisuus taas aiheutuu siitä, että teknologia uudistaa työntekijän aiempia työtehtäviä. Tästä johtuen työntekijä saattaa kokea myös epävarmuutta erilaisten tehtäviensä osaamisesta. Epävarmuutta työn säilymisestä luo se, että teknologia syrjäyttää jatkuvasti ihmisiä työntekijöinä. Jälleen kokemus omasta osaamisesta muuttuu, jolloin pelko työn menettämisestä kasvaa. Teknologia mahdollistaa entistä paremmin etätöiden tekemisen. Tämä saattaa aiheuttaa ristiriitoja työn ja kodin vaatimusten suhteen. Jatkuva, myös ylhäältä päin tuleva paine yhteyden pitämiseen työpaikalle esimerkiksi sähköpostitse aiheuttaa ristiriitoja yksityisyyden säilyttämisessä. Teknologian avulla työntekijöitä pystytään myös seuraamaan tarkemmin, mikä osaltaan vaikuttaa tunteeseen yksityisyyden häirinnästä.

Stressitekijöiden aiheuttamat oireet, eli *stressireaktiot* (engl. strain) [Ayyagari et al., 2011] ilmenevät eri ihmisillä eri tavoin. Siksi erilaisia fyysisiä ja psyykkisiä oireita voikin olla haastavaa tulkita teknostressin aiheuttamiksi stressireaktioiksi. Käsittelen stressin oireita tarkemmin kohdassa 3.2.

2.3. Yksilön ja teknologian välinen tasapaino

Ayyagari ja muut [2011] ovat käyttäneet yleisen yksilö-ympäristö -tasapainomallin (engl. person-environment fit model) pohjalta teknostressitutkimuksia

tukevaa mallia, jossa lähtökohtana on yksilön ja teknologian välinen tasapaino (engl. person-technology fit). Tasapainon määrittämisessä on tärkeää, kuinka yksilö sen kokee; mitä parempi tasapaino on, sitä vähemmän tilanne aiheuttaa yksilölle stressiä. Jos taas yksilön ja ympäristön välillä vallitsee suuri epätasapaino, ilmenee tilanne yksilön kokemana stressireaktiona. Yksilön kokemaa epätasapainoa yksilön ja ympäristön välillä voidaan pitää stressitekijän esias- teena. Epätasapaino siis itse asiassa määrittää stressitekijän.

Epätasapainolle on mallissa kaksi eri lähtökohtaa. Ensimmäinen epätasa- painotilanne syntyy, kun ympäristö ei pysty tarjoamaan yksilön arvoille sopivia puitteita [Ayyagari et al., 2011]. Käytännössä siis yksilö voi toivoa esimerkiksi tietynlaista toimintatapaa, mutta olosuhteiden pakosta kyseinen toimintatapa ei ole mahdollista. Toisaalta epätasapaino voi syntyä tilanteessa, jossa ympäristön vaatimukset eivät kohtaa yksilön kykyjä [Ayyagari et al., 2011]. Toisin sanoen ympäristön tilanne voi vaatia yksilöä tekemään tiettyjä asioita, mutta yksilön taidot eivät riitä toteuttamaan vaatimuksia.

2.4. Teknologiapiirteet

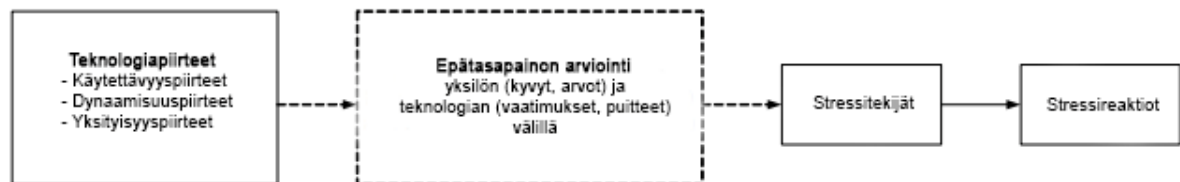
Suurin mysteeri on teknostressin tutkimuksessa on ollut se, mitkä *piirteet* tekno- logiassa tarkalleen ottaen vaikuttavat stressitekijöihin [Ayyagari et al., 2011], eli mikä teknologiassa aiheuttaa teknostressiä. Siksi Ayyagari ja muut [2011] kehit- tävät stressiteoriaa lisäämällä siihen vielä *teknologiapiirteet* (engl. technology characteristics), jotka on muodostettu jaotteleamalla eri teknologian ominaisuu- det kolmeen pääryhmään. Teknologiapiirteet ovat stressitekijöiden esiaste (ku- va 1). Yksilö-teknologia -tasapainomallissa teknologiatyypit näyttelevät tekno- logiaosaa. Kun teknologiatyyppien vaatimukset tai ominaisuudet eivät kohtaa yksilön taitoja tai arvoja, syntyy epätasapaino. Kuten jo kodassa 2.3. mainittiin, tämä epätasapaino edeltää stressitekijöiden muodostumista.

Ayyagarin ja muiden [2011] kehittelemään jaotteluun kuuluu kolme tekno- logiapiirrettä: käytettävyySPIirteet (engl. usability features), dynaamisuuspiirre (engl. dynamic feature) ja yksityisyyspiirteet (engl. intrusive features). Käytet- tävyySPIirteisiin luetaan teknologian hyödyllisyys (engl. usefulness), monimut- kaisuus (engl. complexity) ja luotettavuus (engl. reliability). Hyödyllisyys tässä yhteydessä tarkoittaa käyttäjän kokemusta kyseessä olevan teknologian hyö- dyllisyydestä tietyssä tilanteessa. Monimutkaisuus on yhteydessä siihen, miten mutkikkaaksi tai yksinkertaiseksi käyttäjä kokee jonkin järjestelmän käytön. Luotettavuus taas tarkoittaa käyttäjän kokemusta kyseisen teknologian toimin- tavarmuudesta. KäytettävyySPIirteet eivät tässä yhteydessä viittaa käytettävyy- teen ihmisen ja teknologian välisessä vuorovaikutuksessa, vaan nimi on tarkoi- tettu kuvaamaan kyseisten piirteiden kokonaisuutta.

Dynaamisuuspiirre koostuu teknologian muuttuvaisuudesta (engl. pace of change). Tällä tarkoitetaan sitä, että teknologian kehitys etenee huimaa vauhtia, jolloin muutosten määrä on suuri. Vanhoja teknologioita muotoillaan tehokkaammiksi ja monipuolisemmiksi ja niitä suunnitellaan myös uusiin käyttötarkoituksiin.

Yksityisyyspiirteisiin kuuluu tavoitettavuus (engl. presenteeism), jolla tarkoitetaan teknologian mahdollistamaa henkistä läsnäoloa myös tilanteessa, jossa henkilö ei fyysisesti ole paikalla. Tunnistettavuus (engl. anonymity) viittaa siihen, että teknologian käytön seurauksena yksilön tekemisiä voidaan mahdollisesti jäljittää.

Kuva 1 havainnollistaa Ayyagarin ja muiden [2011] käsitystä teknostressin muodostumisesta. Teknologiapiiirteet aiheuttavat epätasapainon ihmisen ja teknologian välille. Epätasapaino edeltää stressitekijöiden syntymistä, ja stressitekijät aiheuttavat stressireaktioita.



Kuva 1 Teknostressin muodostuminen [Ayyagari et al., 2011]

2.5. Teknostressin aiheuttajat ja ehkäisijät

Ragu-Nathan ja muut [2008] kehittivät jaottelun teknostressin aiheuttajiin ja ehkäisijöihin. Teknostressin *aiheuttajat* (engl. technostress creators) on liitetty yllämainittuihin stressitekijöihin [Ragu-Nathan et al., 2008]. Toisin sanoen ne ovat tekijöitä, joista teknostressin esiintyminen on lähtöisin. Teknostressin aiheuttajiin voivat vaikuttaa myös tietyt yksilön henkilökohtaiset ominaisuudet vahvistamalla teknostressin aiheuttajien stressaavaa vaikutusta [Ragu-Nathan et al., 2008].

Ragu-Nathanin ja muiden [2008] määrittelemissä teknostressin aiheuttajissa on niistä hyviä huomioita, mutta mielestäni ne ovat yhdistettävissä Ayyagarin ja muiden [2011] teknologiapiiirteisiin ja niitä seuraaviin stressitekijöihin. Teknostressin aiheuttajien kokonaisuudesta ei löydy yhtä selvää syy-seuraus -logiikkaa kuin teknologiapiiirteiden ja stressitekijöiden väliltä, vaan ne ovat sekalainen kokoelma molempia. Käytännössä osan teknostressin aiheuttajista voi yhdistää suoraan tiettyyn teknologiapiiirteeseen tai stressitekijään. Jotkut teknostressin aiheuttajista taas ovat tietyn teknologiapiiirteen tai stressitekijän yksi osa-alue.

Teknostressin aiheuttajiin kuuluu Ragu-Nathanin ja muiden [2008] mukaan viisi eri tekijää. Ensinnäkin teknologian jokapäiväistyminen (engl. techno-invasion) mahdollistaa jatkuvan yhteydenpidon niin työpäivän aikana kuin sen jälkeenkin, mikä aiheuttaa ns. jatkuvaa töissä olemista sekä keskeytyksiä työtä tehdessä. Ayyagari ja muut [2011] määrittelevät saman ilmiön tarkoittamaan yksityisyyspiirteistä tavoitettavuutta. Tavoitettavuus taas edistää monen stressitekijän syntymistä.

Ihmiä vaivaa myös teknologian aiheuttama ylikuormitus (engl. techno-overload) [Ragu-Nathan et al., 2008]. Tietoa on saatavilla monesta eri lähteestä, useista eri teknologioista, eikä niiden yhtäaikainen käsitteleminen ole enää tehokasta. Stressitekijöistä työn ylikuormittavuus on määritelty lähes samalla tavalla [Ayyagari et al., 2011], teknologian aiheuttama ylikuormitus on siis kyseisen stressitekijän osatekijä.

Tietotekniikan kehittyessä jatkuvasti tulee ohjelmistoihin lisää ominaisuuksia. Tällöin myös niiden käyttö muuttuu entistä monimutkaisemmaksi (engl. techno-complexity) [Ragu-Nathan et al., 2008]. Teknologiapiirteistä käytettävyyksiin kuuluu teknologian monimutkaisuus [Ayyagari et al., 2011]. Nämä voi suoraan käsittää samaa tarkoittavaksi asiaksi.

Teknologian nopea kehitys muuttaa myös ohjelmistojen käyttöä vanhasta poikkeavaksi. Kun uudistuminen on jatkuvaa, on käyttäjien oltava koko ajan opettelemassa uusien ohjelmistojen toimintaperiaatteita (engl. technouncertainty) [Ragu-Nathan et al., 2008]. Teknologiapiirteisiin kuuluva dynaamisuuspiirre, jolla tarkoitetaan teknologioiden muutosten runsautta [Ayyagari et al., 2011], on syy opetteluun tarpeelle ja siten edeltäjä kyseiselle teknostressin aiheuttajalle. Tämä taas vaikuttaa useisiin eri stressitekijöihin.

Muuttuvien ja kehittyvien ohjelmistojen myötä työntekijät tulevat epävarmoiksi omasta osaamisestaan. Epävarmuus työn säilymisestä (engl. techno-insecurity) johtuu kahdesta eri asiasta [Ragu-Nathan et al., 2011]: ensinnäkin siitä, että työntekijät pelkäävät menettävänsä paikkansa jollekin, joka on pätevämpi teknologian käyttäjä. Toiseksi työntekijät pelkäävät, että teknologia kehittyä korvaamaan ihmisen kyseisessä työssä. Tässä tapauksessa teknostressin aiheuttaja vastaa Ayyagarin ja muiden [2011] määrittelemää työn epävarmuus-stressitekijää.

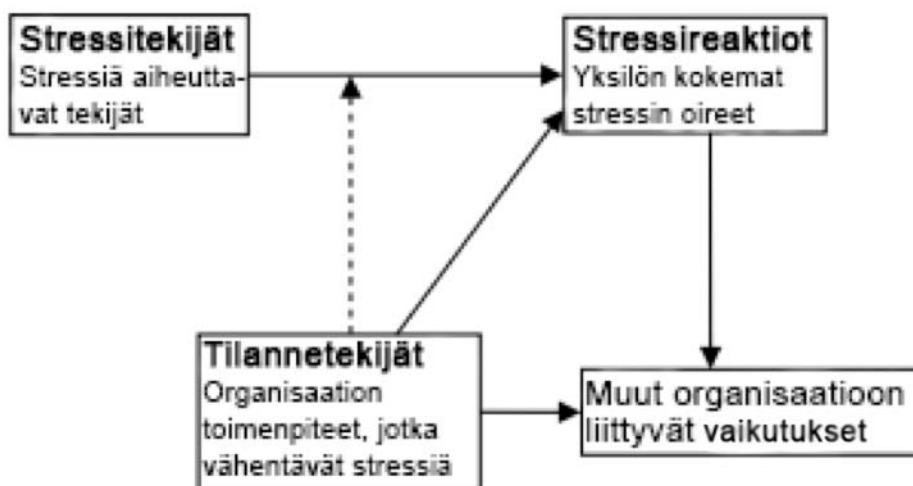
Teknostressin *ehkäisijät* (engl. technostress inhibitors) ovat ympäristötekijöitä, Ragu-Nathanin ja muiden [2008] tutkimuksessa lähinnä organisaatiosta riippuvaisia syitä, jotka vähentävät stressin oireita. Teknostressin ehkäisijät vaikuttavat Ragu-Nathanin ja muiden [2008] teoriassa suoraan lopputulokseen, eli työtyytyväisyyteen. Lisäksi teknostressin ehkäisijät vaikuttavat lieventävästi teknostressin aiheuttajiin.

Ragu-Nathan ja muut [2008] määrittävät kolme tekijää, jotka ehkäisevät teknostressiä ja kyseisessä tutkimuksessa tarkemmin ottaen parantavat työtyytyväisyyttä. Ensinnäkin teknologian käytön opettelun tulisi olla helpompaa (engl. literacy facilitation). Työntekijöiden tulisi jakaa tietoa teknologioista toisilleen, mikä parantaa ymmärrystä käytettävistä ohjelmistoista.

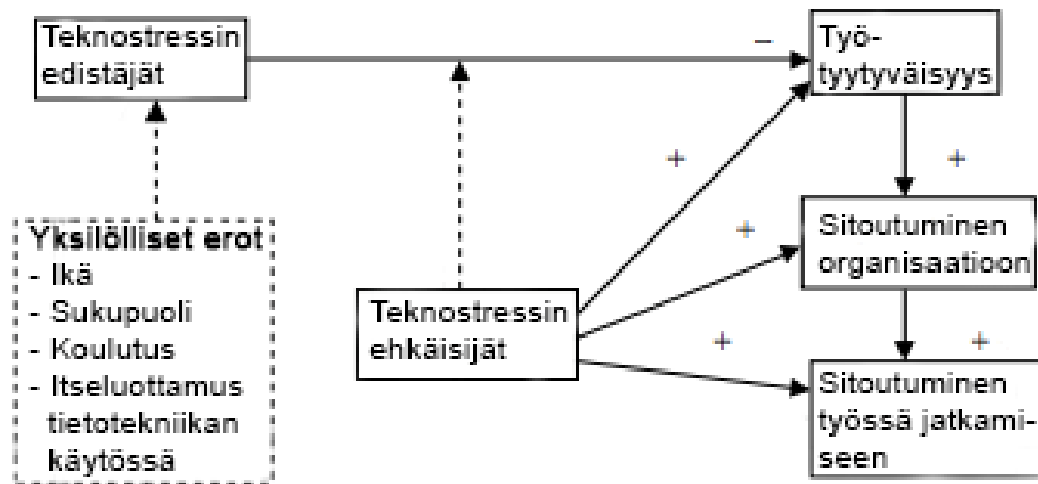
Toinen tärkeä teknostressin ehkäisymenetelmä on teknisen tuen tarjoaminen (engl. technical support provision). Käyttäjien ongelmat tulisi ratkaista, jotta käytön jatkuminen on mahdollista. Kenties myös kokemus avun saamisesta kannustaa käyttöön ja vähentää stressin kokemusta.

Kolmas teknostressin ehkäisijä on käyttöönoton helpottaminen (engl. in-colcement facilitation). Työntekijöille tulisi antaa järkevät perustelut teknologian käytölle ja sen hyödyllisyydelle. Tällöin käyttäjien sisäinen motivaatio järjestelmien käytölle kasvaa ja teknologian hyödyntäminen muuttuu enemmän vapaaehtoiseksi. Samalla työntekijöitä tulisi kannustaa uusien teknologioiden kokeiluun ja käyttöön.

Kuvassa 2 on Ragu-Nathanin ja muiden [2008] kaavio stressitekijöiden ja stressireaktioiden keskinäisestä vuorovaikutuksesta. Organisatoriset tekijät vähentävät stressiä joko suoraan tai alentamalla stressitekijöiden vaikutusta. Kuva 3 taas havainnollistaa stressitekijöihin ja -reaktioihin yhdistettyä mallia teknostressin aiheuttajista ja ehkäisijöistä.



Kuva 2 Stressitekijöiden ja -reaktioiden vuorovaikutus [Ragu-Nathan et al., 2008].



Kuva 3 Teknostressin ehkäisijät ja aiheuttajat [Ragu-Nathan et al., 2008]

3. Teknostressi käytännössä

Syitä teknostressin esiintymiselle voi etsiä lukuisista eri lähtökohdista, eivätkä kaikki ihmiset stressaannu samoista stressitekijöistä. Yksilöt myös reagoivat stressitekijöihin eri tavoin, joten stressin oireet vaihtelevat vähintään yhtä paljon. Tässä luvussa tarkastelen ensin syitä stressin esiintymiseen teknologiapiirteiden ja stressitekijöiden avulla. Samalla ilmenee, kuinka eri teknologiapiirteet vaikuttavat stressitekijöiden syntyyn (kuva 4). Sen jälkeen kerron tarkemmin stressin oireista sekä siitä, miten niitä voidaan ehkäistä.

3.1. Teknostressin aiheuttajat

Tarkastellaan ensimmäiseksi tietotekniikan käyttäjien yksilöllisiä lähtökohtia, kuten ikää, sukupuolta ja koulutusta. Yksilöllisten ominaisuuksien vaikutus alttiuteen kokea teknostressiä on todettu useissa tutkimuksissa [Ragu-Nathan et al., 2008; Riedl et al., 2012; Wang et al., 2008]. Yksilölliset lähtökohdat vaikuttavat esimerkiksi siihen, kuinka hyödyllistä tai helppokäyttöistä teknologian oletetaan olevan. Tunne siitä, ettei kykene käyttämään tietotekniikkaa, aiheuttaa stressin oireita [Ragu-Nathan et al., 2008] ja vastaavasti ongelmat teknologiassa saavat käyttäjät ajattelemaan, että he itse ovat kykenemättömiä käyttämään tietotekniikkaa [Brod, 1984]. Näin kierre on valmis.

Osaamisen kokemus liittyy teknologiapiirteistä käytettävyydspiirteeseen, tarkemmin ottaen monimutkaisuuteen. Monimutkaisen ohjelmiston epäonnistunut käyttäminen saa käyttäjän ajattelemaan, että hänen omissa taidoissaan on parantamisen varaa [Brod, 1984]. Ayyagari ja muut [2008] eivät oletuksista huolimatta havainneet yhteyttä teknologian monimutkaisuuden ja minkään stressitekijän välillä. Syyksi tähän ehdotettiin tutkimuksessa käytettyjen teknologioiden

den vähäistä monimutkaisuutta ja koehenkilöiden hyvää osaamista teknologian käytössä.

Viitteitä monimutkaisen teknologian aiheuttamasta teknostressistä kuitenkin löytyy. Muun muassa Brod [1984] puhuu käytössä olevien teknologioiden muuttumisesta yhä monipuolisemmiksi – ja samalla monimutkaisemmiksi käyttää, mikä kasvattaa käyttäjän henkistä työmäärää (engl. mental workload). Työmäärän kasvun voi selittää työmuistin rajallisuudella: kun iso osa työmuistin, eli lyhytkestoisen muistin, kapasiteetista kuluu tietotekniikan käyttämiseen, jää olennaisen asian käsittelylle vähemmän tilaa [Brod, 1984]. Tällöin aivot joutuvat käsittelemään suurta määrää asioita yhtä aikaa, mikä kertoo työn ylikuormittavuudesta.

Työn ylikuormittavuuteen vaikuttavat Ayyagarin ja muiden [2011] mukaan myös muut käytettävyyksiin: teknologian hyödyllisyys sekä luotettavuus. Myös tunne hyödyllisyydestä ja luotettavuudesta aiheuttaa ylikuormitusta. Jos työn suorittamiseen kuluu enemmän aikaa kuin vanhoilla menetelmillä, käyttäjän kokemus kyseisen teknologian hyödyllisyydestä jää alhaiseksi [Brod, 1984]. Tällöin työntekijä joutuu tekemään saman asian suorittamiseen enemmän työtä kuin aiemmin.

Samantyyppinen ongelma syntyy teknologian luotettavuuden puutteen kanssa. Myös IT-alan asiantuntijoilta vaaditaan tehokkaampaa työskentelyä, jolloin ohjelmistoja saatetaan ottaa käyttöön osittain keskeneräisinä. Tiedot ohjelmistot jätetään tarkoituksella siihen muotoon, että ne on helppo muokata vastaamaan kunkin asiakkaan tarpeita yksilöllisesti. Tällöin työssä käytettävät järjestelmät saattavat aiheuttaa virheitä käyttäjästä riippumattomasta syystä. Ohjelmistossa oleva vika voi lisätä työmäärää, jos työntekijä joutuu toistamaan samaa asiaa useamman kerran saadakseen tehtävän suoritettua. Luotettavuuden stressaavan vaikutuksen aikaansaamiseen riittää joissakin tapauksissa myös pelkkä käyttäjän pelko teknologian toimimattomuudesta. [Ragu-Nathan et al., 2008]

Ohjelmistoja kehitetään nykyään paljon siihen pisteeseen, että ne on helppo muokattavissa kunkin asiakkaan omiin tarpeisiin. Riittävien muutosten tekeminen valmiiseen pohjaan ei kuitenkaan välttämättä ole aivan yksinkertaista, mikä altistaa järjestelmää, ja siten myös työntekijää virheille [Ragu-Nathan et al., 2008]. Myös tämä syö ohjelmiston luotettavuutta.

Paitsi että muutokset käytettävissä tietotekniikoissa tekevät järjestelmistä monimutkaisia, aiheuttavat ne myös sopeutumisongelmia [Ragu-Nathan et al., 2008]. Käytössä olevien teknologioiden muuttuessa jatkuvasti, on käyttäjien opeteltava käyttämään uusia toimintoja ja erilaisia käyttöliittymiä [Wang et al., 2008]. Brodin [1984] mukaan tällaisiin muutoksiin sopeutuminen on monimutkaista (engl. complex adaptation), koska yksilön on tällöin muutettava tapaa

suhtautua itseensä. Myös tässä tapauksessa esimerkiksi kokemus omasta osaamisesta muuttuu kyseenalaiseksi.

Sopeutuminen uuteen on erityisen vaikeaa tilanteissa, joissa muutokset määräytyvät ylhäältä päin, eivätkä ole vapaaehtoisia [Ayyagari et al., 2011]. Organisaatioissa, joissa johto on vahvasti keskittynyttä, teknostressiä esiintyy todennäköisemmin [Wang et al., 2008]. Tämä on yleisempää suurissa yrityksissä, joissa työntekijät eivät osallistu päätöstentekoon, vaan päätökset esimerkiksi uusien teknologioiden käyttöönotosta tehdään johtoportaan kesken [Wang et al., 2008].

Teknologian muuttuminen on teknologiapiirteistä dynaamisuuspiirteen ominaisuus. Kuten teknologian monimutkaisuudenkin kohdalla, uuden opettelu on työntekijöille yksi tehtävä lisää hoidettavaksi [Ayyagari et al., 2011] ja vaikuttaa siten työn ylikuormittavuuteen etenkin kokemattomilla tietotekniikan käyttäjillä [Brod, 1984]. Teknologian opettelu ajautuu myös osaksi käyttäjien työtehtäviä, millä on vaikutusta stressitekijöistä myös työroolin monitulkintaisuuteen. Kun omien tehtävien rajat hämärtyvät, kyseenalaistuu tällöin myös ammatillinen osaaminen.

Teknologian sisällyttäminen osaksi työtehtävien suorittamista vaikuttaa myös omalta osaltaan osaamisen kokemukseen. Jos käyttäjä tuntee epävarmuutta teknologian käytössä ja teknologian kuuluu osaksi työtehtäviä, on myös ammatillinen osaaminen epävarmaa. Tämä kasvattaa pelkoa työpaikan menettämisestä jollekin, jonka teknologiataidot ovat paremmat. Myös työnantaja voi kasvattaa pelkoa kiinnittämällä huomiota toisten työntekijöiden erityisen hyvään osaamiseen teknologian käytöstä. [Wang et al., 2008]

Käytännössäkin on nähtävissä se, että mitä pidemmälle tietotekniikka kehittyy, sitä jokapäiväisemmäksi se tulee. Nykyään ihmiset kantavat esimerkiksi mobiililaitteita mukanaan joka paikkaan ja yhteydenpidon mahdollistavat viestintäsovellukset ovat yleistyneet myös niissä. Tämä mahdollistaa yhteydenpidon työtovereihin mistä vain, milloin vain [Ragu-Nathan et al., 2008]. Työntekijät kokevat paineen jatkuvaan tavoitettavissa olemiseen myös työnantajan asettamana [Wang et al., 2008] Työajan ulkopuolella yhteydenpito muuttaa töissä tai vapaalla olemisen rajat epämääräisemmiksi. Työaikana taas jatkuvat keskeytykset katkaisevat keskittymisen työn tekoon. Teknologiasta johtuen työntekijät ovat aina tavoitettavissa [Ayyagari et al., 2011].

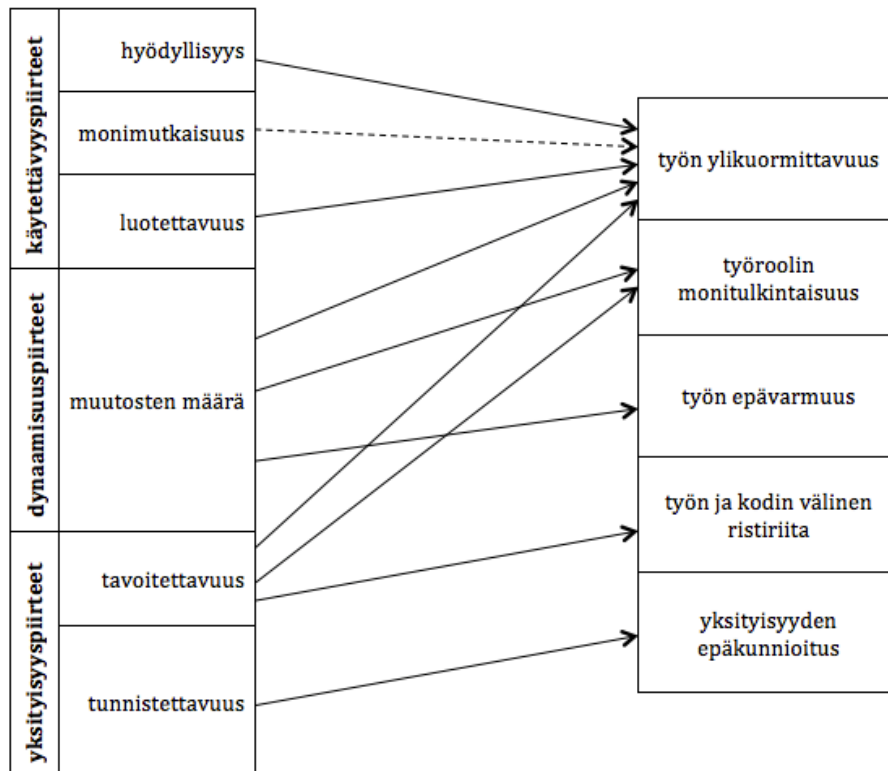
Tavoitettavuus on yksityisyyspiirteisiin kuuluva ominaisuus. Jatkuva työasioiden ajattelu ja keskittymisen herpaantuminen vaikuttavat osaltaan työn ylikuormittavuuteen. Muita stressitekijöitä, joihin tavoitettavuudella on vaikutusta, ovat työroolien monitulkintaisuus sekä työn ja kodin välinen ristiriita. Työroolit uusiutuvat, kun myös työnantaja kannustaa työntekijöitä joustamaan työaikojen suhteen. Samalla kodin asettamat vaatimukset saattavat olla ristirii-

dassa työnantajan ja työpaikan toiveiden kanssa. Jatkuva tavoitettavissa oleminen saattaa nostaa stressitason jopa niin korkealle, että työntekijä palaa loppuun. [Ayyagari et al., 2011]

Teknologian avulla kyetään nykyään myös seuraamaan sen käyttäjien liikkeitä. Työnantaja saa työntekijöistään tarkempaa tietoa muun muassa sähköisen työajanseurannan avulla. Myös tietokoneen käytön seuraaminen on mahdollista. Tämä rikkoo työntekijän yksityisyyttä ja teknologiapiirteisiin liittyen edistää erityisesti toista yksityisyyspiirteiden ominaisuutta, tunnistettavuutta. Stressitekijöistä tunnistettavuus vaikuttaa yksityisyyden epäkunnioitukseen. [Ayyagari et al., 2011]

Ayyagari ja muut [2011] havaitsivat tutkimuksessaan, että suurin vaikutus stressireaktioiden syntyyn on työn ylikuormittavuudella ja työroolien monitulkintaisuudella. Teknologioiden, keskeytysten ja uusien vaatimusten keskellä työhön keskittyminen tuottaa työntekijöille selvästi suuria haasteita. Toiseksi eniten stressireaktioiden esiintymistä edesauttavat työn ja kodin väliset ristiriidat, ja kolmanneksi eniten työn epävarmuus. Yksityisyyden laiminlyönti vaikuttaa stressitekijöistä vähiten stressireaktioiden ilmenemiseen.

Kuvassa 4 on havainnollistettu teknologiapiirteiden vaikutus stressitekijöihin. Ayyagari ja muut [2011] havaitsivat kaikki muut yhteydet, paitsi monimutkaisuuden vaikutuksen työn ylikuormittavuuteen. Monimutkaisuuden ja ylikuormittavuuden suhde voidaan kuitenkin todeta esimerkiksi Brodin [1984] kirjallisuudesta.



Kuva 4 Teknologiapiirteiden vaikutus stressitekijöihin [vrt. Ayyagari et al., 2011].

3.2. Teknostressin oireet

Teknostressin oireet ovat kuten minkä tahansa muun stressin oireet, ja ne voivat olla joko fyysisiä tai psyykkisiä [Brod, 1984; Riedl et al., 2012]. Brod [1984] on havainnut, että fyysisiä teknostressin aiheuttamia oireita ovat muun muassa päänsärky ja muut kiputuntemukset niska- ja hartiasseudulla. Riedl ja muut [2012] olivat kuitenkin ensimmäisiä, jotka tutkivat teknostressin aiheuttamia fyysisiä oireita laboratoriotasolla. Tutkimuksessa selvisi, että järjestelmän kaahtuminen nostaa käyttäjien stressihormonin, eli kortisolin, tasoa huomattavasti. Aiemmissa stressitutkimuksissa taas on todettu, että korkea kortisolitaso muun muassa nostaa verensokeria, verenpainetta ja sykettä, heikentää immuunipuolustusta ja aiheuttaa univaikeuksia [Riedl et al. 2012].

Ragu-Nathan ja muut [2008] vertaavat stressireaktiota työtyytyväisyyteen. Työtyytyväisyyden väheneminen on yksi selvä teknostressin seuraus organisaatioissa. Myös Wang ja muut [2008] raportoivat teknostressin aiheuttamasta työtyytyväisyyden laskusta. Huonon työtyytyväisyyden seurauksena työssä jaksaminen vähenee. Ragu-Nathanin ja muiden [2008] käsitelmallisissa työtyytyväisyydellä on suora yhteys myös muihin organisaatioon liittyviin asioihin. Työntekijät eivät ole niin sitoutuneita työyhteisöön sekä organisaatioon, jolloin työtä ei tehdä organisaation mainetta ajatellen. Kun yhteisöllisyyden tunne vä-

henee vähäisen sitoutuneisuuden johdosta, vaihtuvuus työpaikassa lisääntyy (kuva 3).

Teknostressin johdosta työntekijät kärsivät motivaation puutteesta ja teknologian avulla suoritettavat työtehtävät aiheuttavat turhautuneisuutta [Brod, 1984]. Wangin ja muiden [2008] mukaan runsaan teknologian käytön aiheuttama stressi voi olla pitkäaikaista ja johtaa jopa masennukseen. Pitkäaikainen korkea stressitaso voi aiheuttaa työntekijän loppuun palamisen [Ayyagari et al., 2011; Riedl et al., 2012]. Teknostressi ilmenee myös ärsyyntyneisyytenä, kireytenä, pettuneisyytenä ja pelkona teknologiaa kohtaan [Brod, 1984].

Teknologia saa käyttäjät myös ajattelemaan samaan tyyliin kuin esimerkiksi tietokoneet toimivat. Ihmiset tavoittelevat täsmällisyyttä, mitä tietokoneet ilmentävät. Myös mustavalkoajattelu on tyypillistä henkilöille, jotka käyttävät teknologiaa runsaasti. Näistä johtuen luova ajattelu sekä kyky luottaa ihmisiin vähenevät. [Brod, 1984]

Brod [1984] on havainnut teknologian käytön olevan yhteydessä muuttuneeseen suhtautumiseen muihin ihmisiin. Tietotekniikkaa käyttäessään ihminen tottuu koneen mekaaniseen suoriutumiseen ja nopeaan vastinaikaan. Vähitellen kärsivällisyys ihmisten inhimillisyyttä kohtaan katoaa, ja esimerkiksi hidas tai epätasainen vastaaminen kysymykseen saa aikaan ärsyyntymistä.

3.3. Teknostressin vähentäminen

Ragu-Nathanin ja muiden [2008] kolme teknostressin ehkäisijää ovat hyvä lähtökohta teknostressin vähentämiseksi organisaatioissa. Teknologian opettelu on helpompaa yhdessä muun työyhteisön kanssa. Tällöin ei välttämättä synny tunnetta, että olisi yksin ongelmien keskellä. Tekninen tuki auttaa tilanteissa, joissa järjestelmässä on virhe, jota käyttäjä ei voi ratkaista. On myös olennaista perustella työntekijöille, *miksi* kyseinen teknologia on tärkeä ottaa käyttöön, jotta käyttö ei ole vain ylhäältä päin tuleva selittämätön vaatimus.

Ayyagari ja muut [2011] taas suosittelevat stressin vähentämistä keskitty-mällä niihin tekijöihin, jotka stressiä eniten aiheuttavat. Suurimmaksi stressitekijäksi Ayyagarin ja muiden [2011] tutkimuksessa havaittiin työroolin monitulkintaisuus, kun taas suurin stressitekijöitä vahvistava teknologiapiirre oli tavoitettavuus. Tärkeä keino teknostressin vähentämiseen ja ennaltaehkäisyyn on siis organisaation tuki. Työnantajien tulisi kannustaa työntekijöitä rajaamaan työ- ja vapaa-ajan toisistaan tarkasti. Myös koulutus tehokkaaseen ajankäyttöön voisi auttaa työntekijöitä selviämään tilanteista paremmin.

Sekä Ayyagari ja muut [2011] että Ragu-Nathan ja muut [2008] ovat päässeet samoihin tuloksiin ehdottaessaan keinoja työntekijöiden teknostressin vähentämiseen; Ayyagarin ja muiden [2011] keinot ovat selvästi organisaatioon tukeutuvia. Näin on myös Ragu-Nathanin ja muiden [2008] teknostressin eh-

käisijöistä kahdessa: käytön opettelussa organisaatio ja työnantaja ovat selvästi pääroolissa. Myös työntekijöiden huomioiminen perustelemalla teknologian käyttöönotto on organisaation tehtävä. Wangin ja muiden [2008] mukaan organisaatioiden tulisi pyrkiä myös vähentämään byrokratiaa ja ottaa työntekijät mukaan päätöksentekoon uusia teknologioita harkittaessa.

Teknostressiä voi pyrkiä selättämään myös joko *tunnepohjaisella strategialla* (engl. emotion-focused strategies) tai *ongelmapohjaisella strategialla* (engl. problem-focused strategies). Tunnepohjaisessa strategiassa pyritään olemaan ajattelematta itse ongelmaa. Tarkoituksena on saada teknostressistä kärsivä yksilö voimaan paremmin ja pärjäämään stressin kanssa. Tunnepohjaisessa strategiassa on se huono puoli, että ongelmaan ei saada ratkaisua. Ongelmapohjaisessa strategiassa taas pyritään nimenomaan poistamaan stressiä välttämällä tilanteita, joissa ongelma esiintyy ja käsittelemällä asioita myös niiden henkilöiden kanssa, joilla on mahdollisesti vaikutusta teknostressin esiintymiseen. [Riedl et al., 2012; Wang et al., 2008]

4. Teknostressitutkimuksen tarve

Koska teknologian hyödyntäminen ei lähitulevaisuudessa varmasti tule vähenemään, on myös teknostressin lisääntyminen hyvin todennäköistä. Tästä syystä käytännön työtä sekä tulevaisuuden tutkimuksia hyödyntävien tarkkojen teorioiden kehittäminen on tärkeää. Teorioiden avulla ratkaisuja ongelmiin on helpompi etsiä. Aiemman tutkimusmateriaalin perusteella teknostressin syitä on tutkittu jo kohtalaisesti. Seuraava askel olisikin mielestäni kehittää täsmällisempiä menetelmiä teknostressin ennaltaehkäisyyn ja lieventämiseen.

Teknostressin vähentäminen ja ennaltaehkäisy on tärkeää niin yksilön hyvinvoinnin kuin organisaationkin kannalta. Yksilön kokema stressi voi aiheuttaa pitkäaikaisia seurauksia kuten masennusta, mikä taas aiheuttaa organisaatiolle kustannuksia muun muassa sairauspoissaolojen vuoksi [Ayyagari et al., 2011]. Teknostressistä kärsivien työntekijöiden on myös todettu olevan huomattavasti tehottomampia ja siten organisaatiolle kannattamattomampia kuin työntekijät, jotka eivät kärsi teknostressistä [Wang et al., 2008]. Kuten kohdassa 3.3. todettiin, organisaatioilla on vahvat mahdollisuudet – ja myös syyt – vaikuttaa työntekijöiden kokemaan teknostressiin muun muassa koulutusten avulla.

Ayyagari ja muut [2011] totesivat, että yksi merkittävimmistä stressitekijöistä teknostressin synnyssä on työn ylikuormittavuus. Kyseiseen stressitekijään vaikuttavat teknologiapiirteistä käytettävyyksiirteet. Jatkon kannalta olisikin mielenkiintoista tutkia myös sitä, kuinka järjestelmän käytettävyydellä voidaan vaikuttaa teknostressiin sitä ehkäisevällä tavalla. Tämä voisi olla kiinnostava tutkimusaihe esimerkiksi pro gradu -tutkielmaa ajatellen.

5. Yhteenveto

Teknologian kehitys on ollut nopeaa jo useamman vuosikymmenen ajan. Teknologian kehittyessä siitä on tullut yhä monimutkaisempaa ja jokapäiväisempää, mikä aiheuttaa stressin oireita käyttäjille. Teknostressiä on tutkittu viime vuosina kohtalaisen paljon, ja syitä sen ilmenemiselle on löydetty. Tutkijat ovat yhtä mieltä siitä, että tietyt teknologian ominaispiirteet muodostavat stressiä aiheuttavia kokonaisuuksia.

Tässä tutkielmassa käsitellyn tutkimuskirjallisuuden perusteella tärkeä tutkimusalue teknostressiin liittyen on teknostressin vähentämisen keinot. Vähentämiskeinojen tuntemus hyödyttäisi niin yksilön terveydentilaa kuin organisaation tuottavuutta. Organisaatioiden toimenpiteet ovat tämänhetkisen tiedon mukaan yksi tärkeimmistä keinoista estää työntekijöiden teknostressin syntymistä.

Viiteluettelo

- [Ayyagari et al., 2011] Ramakrishna Ayyagari, Varun Grover and Russel Purvis, Technostress: technological antecedents and implications. *MIS Quarterly* **35**, 4 (Dec. 2011), 831-858.
- [Brod, 1984] Craig Brod, *Technostress: The Human Cost of the Computer Revolution*. Addison-Wesley, 1984.
- [Ragu-Nathan et al., 2008] T. S. Ragu-Nathan, Monideepa Tarafdar, Bhanu S. Ragu-Nathan, and Qiang Tu, The consequences of technostress for end users in organizations: conceptual development and empirical validation. *Information Systems Research* **19**, 4 (2008), 417-433.
- [Riedl et al., 2012] René Riedl, Harald Kindermann, Andreas Auinger and Andrija Javor, Technostress from a neurobiological perspective. *Business & Information Systems Engineering* **4**, 2 (Apr. 2012), 61-69.
- [Wang et al., 2008] Kanliang Wang, Qin Shu and Qiang Tu, Technostress under different organizational environments: An empirical investigation. *Computers in Human Behavior* **24**, 6 (Sep. 2008), 3002-3013.
- [Weil and Rosen, 1997] Michelle M. Weil and Larry D. Rosen, *Technostress: Coping with Technology @Work @Home @Play*. J. Wiley, 1997.

Web-tiedonloughinnan hyödyntäminen internetmainonnassa

Anni Moilanen

Tiivistelmä

Internetin yleistyttyä nopeasti viimeisen vuosikymmenen aikana osaksi ihmisten arkielämää on internetissä tapahtuva mainonta vakiinnuttanut paikkansa sähköisessä liiketoiminnassa. Internetissä on saatavilla monenlaista tietoa, jota voidaan hyödyntää mainosten kohdentamisessa oikealle ihmisryhmälle. Tämä tutkielma esittelee, kuinka web-tiedonloughintaa hyödynnetään internetmainonnassa ja mainosten kohdentamisessa.

Avainsanat ja -sanonnat: Web-tiedonloughinta, internetmainonta, kohdennettu mainonta

1. Johdanto

Internet on hyvin monipuolinen media: internetissä tiedon julkaiseminen on helppoa ja halpaa ja julkaisijana voi toimia kuka vain. Internetin käyttäjistä ja internetin käytöstä saadaan kerättyä paljon tietoa. Tätä tietoa on internetin alkuajoilta lähtien hyödynnetty mainostamisessa ja etenkin mainosten kohdentamisessa. Sosiaalisessa mediassa, internetin hakukoneita käyttäessä sekä uutisivuja selaillessa törmää nykyään väistämättä mainoksiin. Pyrkimyksenä on, että mainoksia näytettäisiin vain potentiaalisille asiakkaille. Nykyään tekniikat ovat kehittyneet siinä määrin, että mainoksia kohdistetaan eri käyttäjäryhmille hyvin tarkasti.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan internetmainontaa sekä liiketaloudellisesta että tietojenkäsittelytieteellisestä näkökulmasta. Ensin esitellään lyhyesti, mitä tarkoitetaan web-tiedonloughinnalla. Seuraavaksi esitellään internetin mainosysteemiä sekä internetin toimijoita ja tutustutaan internetmainonnan kehitykseen. Lopuksi esitellään tarkemmin web-tiedonloughinnan lähteitä, tekniikoita ja tiedonloughintaprosessia sekä tiedonloughinnan tulosten soveltamista mainontaan. Viimeisessä luvussa kuvataan esimerkkitapaus tiedonloughintaprosessin tulosten soveltamisesta mainosten kohdentamiseen, joka perustuu Yagoon tutkimusryhmän julkaisemaan tutkimusartikkeliin.

2. Web-tiedonloughinta

Web-tiedonloughinnalla tarkoitetaan tiedonloughinnan osa-aluetta, jossa louhitetaan mahdollisesti kiinnostavaa, piilossa olevaa tietoa internetistä. Web-tiedonloughinta voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: sisällön loughintaan, raken-

teen louhintaan sekä käytön louhintaan. Internetin käytön lisääntyessä jatkuvasti myös web-tiedonlouhinnan merkitys kasvaa. Internetistä louhitun tiedon avulla voidaan suunnitella sivustoja käyttäjäystävällisiksi ja hyvin käyttäjän tarpeita palveleviksi. Hakukoneet hyödyntävät tiedonlouhinnan tekniikoita ja auttavat näin käyttäjää löytämään tiensä etsimänsä tiedon äärelle. Internetistä louhittua tietoa hyödynnetään erityisesti sähköisessä kaupankäynnissä ja sähköisessä liiketoiminnassa, joissa web-tiedonlouhintatekniikoiden avulla koetaan ennustaa tulevaa ostoskäyttäytymistä. [Patil and Patil, 2012]

Internetissä on saatavilla monenlaista materiaalia, jota voidaan louhia. Srivastavan ja muut [2000] jaottelevat internetissä olevan datan neljään päätyyppiin: sisältö, rakenne, käyttö sekä käyttäjäprofiilit.

Sisältö tarkoittaa internetissä olevaa *varsinaista* tietoa, eli siis sitä tietoa, joka on tarkoitus välittää sivuston käyttäjälle. Sisältö koostuu usein grafiikasta ja tekstistä, mutta nykyään myös näitä monipuolisemmista elementeistä, kuten videoista ja äänestä.

Internetsivuston rakenteella tarkoitetaan tapaa, jolla sivuston sisältö on organisoitu. Sivuston rakennetta voidaan tarkastella sivuston toteutuksen pohjalta olevien HTML-dokumenttien avulla. Rakenteen tiedonlouhinnassa erityisenä kiinnostuksen kohteena ovat hyperlinkit, jotka yhdistävät sivuston osia toisiinsa ja toisaalta myös eri sivustoja toisiinsa.

Internetin käyttöä voidaan tutkia web-palvelimen, välityspalvelimen ja selaimen avulla. Sivuston käyttöä tutkittaessa ollaan kiinnostuneita käyttäjän navigointipoluista ja klikkausvirrasta, jotka muodostuvat hänen käyttäessään sivustoa tarpeidensa mukaisesti.

Käyttäjäprofiileiden avulla käyttäjistä saadaan yksityiskohtaista tietoa. Käyttäjäprofiileita saadaan esimerkiksi sivustolle rekisteröitymisestä, jolloin kaikki käyttäjät ovat rekisteröitymisen yhteydessä antaneet joitain tietoja itsestään. Rekisteröitymistietoja voivat olla vaikkapa ikä ja sukupuoli.

3. Internetmarkkinointi ja -mainonta

3.1 Mainonta osana asiakkuudenhallintaa

Asiakkuudenhallinnalla (*customer relationship management, CRM*) tarkoitetaan prosesseja, joilla pyritään luomaan ja ylläpitämään pitkäkestoisia ja tuottoisia suhteita asiakkaisiin. Internetin nopea yleistyminen on kasvattanut mahdollisuuksia markkinointiin ja samalla myös muuttanut oleellisesti tapoja, joilla asiakassuhteita hallitaan ja johdetaan [Ngai et al., 2008]. Erilaiset tiedonlouhinnan tekniikat ovat olleet jo pitkään tärkeä osa asiakkuudenhallintaa, mutta in-

ternetin yleistymisen myötä asiakkaiden käyttäytymisestä ja ominaisuuksista on saatu kerättyä aivan uudenlaista tietoa web-tiedonlouhinnan avulla.

Asiakassuhteen hallinta koostuu neljästä vaiheesta, jotka ovat [Ngai et al., 2009]:

1. asiakkaan tunnistaminen (*customer identification*)
2. asiakkaan huomion kiinnittäminen (*customer attraction*)
3. asiakkaan säilyttäminen (*customer retention*) ja
4. asiakkuuden kehittäminen (*customer development*).

Nämä neljä osa-aluetta voidaan nähdä myös yhtenä syklinä, joka alkaa asiakkaan tunnistamisesta päättyen jälleen siihen. Kaikilla asiakassuhteen hallinnan osa-alueilla on yhteinen päämäärä: luoda syvempi ymmärrys asiakkaasta, jotta asiakkaan arvo yritykselle voidaan maksimoida pitkällä tähtäimellä. Asiakkaan etu on myös yrityksen etu, sillä tyytyväisestä asiakkaasta on yritykselle kaikista eniten hyötyä. Tyytyväisen asiakkaan kanssa yhteistyö todennäköisesti jatkuu myös tulevaisuudessa ja toisaalta tyytyväinen asiakas voi myös suositella yritystä potentiaalisille uusille asiakkaille.

Asiakkaan tunnistamisessa analysoidaan, millainen on yrityksen tavoittelema asiakaskunta. Toisaalta pyritään tunnistamaan asiakkaat, jotka olisivat yritykselle mahdollisimman tuottoisia, toisaalta tunnistamaan asiakkaat, jotka todennäköisimmin tulisivat yrityksen asiakkaiksi. Tunnistamisvaiheessa pyritään identifioimaan myös asiakkaat, jotka ovat jostain syystä siirtyneet kilpailevan yrityksen asiakkaiksi. Tunnistamisvaiheessa asiakkaita segmentoidaan heidän ominaisuuksiensa perusteella erilaisiin kohderyhmiin, esimerkiksi yritys- ja yksityisasiakkaisiin.

Asiakasryhmien segmentoinnin jälkeen siirrytään suoramarkkinoinnin vaiheeseen, jossa asiakkaan kiinnostus pyritään herättämään. Asiakassegmenteille suunnataan yrityksen tuotetta tai palvelua esitteleviä mainoksia. Mitä paremmin potentiaaliset asiakkaat tunnetaan, sitä paremmin mainonta saadaan kohdennettua siten, että heidän kiinnostuksensa saadaan heräämään. Mainonnan avulla voidaan saada uusia asiakkaita yritykselle ilman, että heidän kanssaan tarvitsee olla suorassa vuorovaikutuksessa [Desphande et al., 2014]. Mainonnan avulla pystytään myös ylläpitämään jo olemassa olevia asiakassuhteita.

Kun yritykselle on saatu houkuteltua uusia asiakkaita, siirrytään seuraavaan vaiheeseen, eli asiakkaan säilyttämiseen. Tässä vaiheessa tärkeintä on pitää asiakas tyytyväisenä; hän saa sen mitä on luvattu. Asiakkaan tarpeiden muutoksessa pyritään pysymään mukana seuraamalla ja analysoimalla asiakkaan ostokäyttäytymistä ja personalisoimalla mainontaa juuri kyseisen asiakkaan tai asiakassegmentin tarpeita vastaavaksi. Toisaalta voidaan luoda erilai-

sia uskollisuuskampanjoita, joilla kannustetaan säilymään yrityksen asiakkaana.

Viimeinen vaihe ennen syklin alkuun palaamista on asiakassuhteen kehittäminen. Tässä vaiheessa analysoidaan asiakkaan elinkaariarvo eli ennuste siitä, paljonko kyseinen asiakas tulee tuottamaan yritykselle. Asiakkaan ostokäyttäytymistä koetetaan ymmärtää ostoskorianalyysin avulla ja sen perusteella harjoitetaan ristiinmyyntiä (*cross selling*). Ostoskorianalyysissä pyritään maksimoimaan asiakkaan arvo yritykselle tunnistamalla ostokäyttäytymisessä olevaa säännönmukaisuutta ja hyödyntämällä tätä tietoa asiakassuhteen parantamisessa. Ristiinmyynnillä pyritään kasvattamaan asiakkaan keskiostosta markkinomalla tälle tuotetta tai palvelua, joka usein ostetaan yhdessä asiakkaan jo valitseman tuotteen tai palvelun kanssa. Esimerkiksi verkkokaupassa asiakkaan ostettua uuden puhelimen hänelle voidaan suositella lisävarusteita.

Asiakkuudenhallinnan jokaisessa vaiheessa voidaan hyödyntää web-louhinnan tekniikoita. Tekniikoita ja niiden soveltamista markkinointiin ja mainontaan esitellään luvussa viisi.

3.2 Internetin mainossysteemi ja käyttäjäryhmät

Viimeisen vuosikymmenen aikana internetissä tapahtuva mainonta on kasvanut 2000-luvulla merkittävästi joka vuosi [Deshpande et al., 2014]. Muthukrishnan ja muut [2010] kuvaavat toimintaa internetissä kolmen osapuolen vuorovaikutuksena. Nämä osapuolet ovat käyttäjät, julkaisijat ja mainostajat. Riippuen internetin käyttötilanteesta sama henkilö voi toimia eri rooleissa käyttäessään internetiä. Käyttäjä saapuu erilaisille sivuille tarkoituksenaan etsiä tai selailla niillä olevaa tietoa. Julkaisija on henkilö, joka kontrolloi internetsivua ja tuottaa niiden sisällön. Mainostaja käyttää julkaisijan sivustoa kanavanaan mainonnalle koettaessaan saavuttaa käyttäjän huomion.

Verkkomainonta voidaan jakaa kahteen tyyppiin: sponsoroidut hakumainokset (*sponsored search ads*) ja näyttömainokset (*display ads*). Julkaisija sponsoroidussa hakumainonnassa on hakukone. Mainostaja taas voi olla kuka tahansa, joka on maksanut hakukoneelle mainoksensa julkaisemisesta. Sponsoroidut hakumainokset esiintyvät hakukoneilla suoritettavien hakujen yhteydessä. Käyttäjä saapuu hakukoneen, kuten Googlen, Yagoon tai Bingin sivuille, ja tekee haun. Haun aihepiiriin liittyen hakukone näyttää hakutuloksen yhteydessä mainoksia, joiden sisältö on yleensä tekstiä. Tyypillisesti mainostaja ei maksa vielä mainoksen näyttämisestä mitään, vaan vasta jos käyttäjä klikkaa mainosta (*pay-per-impression*) tai kun käyttäjä ostaa jotain mainostajan sivulta (*pay-per-conversion*). Mainostajat rajaavat mainonnan koskemaan vain joitain tiettyjä ha-

kusanoja ja niiden yhdistelmiä tavoittaakseen kaikista otollisimmat asiakkaat. [Muthukrishnan et al., 2010]

Näyttömainokset perustuvat toisenlaisiin julkaisijoihin, joilla on paljon liikennettä niiden ylläpitämän sivuston sisällön takia. Esimerkiksi YouTube ja uutissivustot ovat näyttömainosten tyypillisiä julkaisijoita. Näillä julkaisijasivustoilla mainontaa kohdennetaan perustuen käyttäjän demografisiin tekijöihin, kuten käyttäjän arvioituun ikään tai sukupuoleen. Näyttömainokset ovat tyypillisesti jotain muuta kuin tekstiä: videoita, kuvia tai muuta rikasta mediaa, jotta saadaan käyttäjän huomio kiinnittymään mainokseen. Mainostaja ja julkaisija voivat tehdä sopimuksen mainonnasta keskenään, mutta tätä yleisempi tapa on nykyään käyttää mainosvälittäjiä (*ad exchange*) tähän tarkoitukseen. Mainosvälittäjä etsii ja näyttää sivuston selailijalle sopivan mainoksen reaaliajassa hyödyntäen web-tiedonlouhinnan tekniikoita. [Muthukrishnan et al., 2010]

3.3 Internetmainonnan kehitys 2000-luvulla

Informaatioteknologian nopea kehitys ja yleistyminen 2000-luvulla ovat johtaneet siihen, että internet on länsimaissa lähes jokaisen ulottuvilla ja osana jokapäiväistä elämää. Internetin kehityksen myötä sähköinen kaupankäynti on vakiinnuttanut paikkansa osana liike-elämää ja lisännyt myös olennaisesti internetissä tapahtuvaa mainontaa. Internet on mahdollistanut sellaisten potentiaalisten asiakkaiden tavoittamisen, jotka ovat perinteisen median, kuten television ja lehtien, ulottumattomissa. Internetin myötä tehokas asiakaskunnan segmentointi ja sen perusteella suoritettu kohdennettu mainonta on yleistynyt huomattavasti.

Yksi konkreettinen mittari internetmainonnan yleistymisestä on kohdennettuun mainontaan liittyvien patenttien runsas lisääntyminen viimeisen kymmenen vuoden aikana. Google, Yahoo ja Microsoft ovat tällä hetkellä johtavia patenttien haltijoita, kun tarkastellaan haettujen patenttien määrää [Desphande et al., 2014]. Suurten hakukoneyritysten, kuten Googlen ja Yahoon, asema patenttien haltijoina kertoo omalla tavallaan hakukoneiden osuudesta internetissä tapahtuvassa mainonnassa. Hakukonetta käyttämällä internetin käyttäjä oma-toimisesti antaa itsestään ja kiinnostuksen kohteistaan markkinoinnin kannalta tärkeää tietoa. Näin ollen tiedetään jo, mistä käyttäjä on kiinnostunut, ja ainoksi tehtäväksi jää hakea aiheeseen liittyvä mainos ja näyttää se käyttäjälle hakutulosten yhteydessä.

Perinteisesti asiakaskunnan erittely perustuu demografisiin tekijöihin tai sijaintiin [Aly et al., 2012]. Demografisia eli väestötieteellisiä tekijöitä ovat esimerkiksi ikä, sukupuoli, koulutustaso tai siviilisääty. Näiden tietojen perusteel-

la valitaan asiakassegmentti, jolle mainos halutaan näyttää. Aiemmin näitä tietoja on saatu kerättyä yrityksen asiakasrekistereistä ja tutkimalla asiakkaan aiempaa ostokäyttäytymistä. Nykyään vastaavia tietoja saadaan kerättyä tutkimalla internetin käyttöä [Aly et al., 2012].

Asiakkaan sijainti on suurin yksittäinen tekijä, jonka perusteella mainontaa kohdennetaan internetissä [Desphande and al., 2014]. Kohdennettuun mainontaan suuntautuneita patentteja haettiin eniten vuonna 2011, jolloin patenteja myönnettiin yhteensä noin 400 [Desphande and al., 2014]. Todennäköisesti älypuhelinnopea lisääntyminen kiihdytti kohdennetun mainonnan kehitystä tuolloin. Useisiin älypuhelinsovelluksiin, kuten karttasovelluksiin (esimerkiksi Google Maps), liittyy käyttäjän sijaintitietojen seuraaminen. Käyttämällä sovellusta käyttäjä hyväksyy sijaintitietojensa keräämisen. Näin ollen sijaintiin perustuvasta mainonnasta on tullut erittäin helppoa. Sijaintitietoja voidaan kerätä myös internetpalveluiden käyttäjäprofiileista, joissa käyttäjä itse on kertonut esimerkiksi asuinkaupunkinsa.

Muita mainoksen kohdentamisen perusteita ovat demografiset tekijät, kuten ikä ja sukupuoli, mutta myös psykografiset tekijät [Desphanden et al., 2014]. Psykografisia tekijöitä ovat arvot, asenteet ja kiinnostuksen kohteet. Aly ja muut käyttävät termiä ”behavioral targeting” eli käyttäytymiseen perustuva kohdentaminen kuvaamaan mainosten kohdentamista, joka tehdään internetin käyttöhistorian perusteella. Facebookin ja muiden sosiaalisen median palveluiden yleistymisen myötä myös sosiaalisten verkostojen perusteella tapahtuva mainosten kohdentaminen on lisääntynyt.

Neljä suurinta kohdennettua mainontaa hyödyntävää liiketoiminta-aluetta ovat suuruusjärjestyksessä matkustukseen liittyvät tuotteet ja palvelut, pankkitoiminta, vakuutustoiminta ja autokauppa [Desphande et al., 2014]. Nykyään tosin lähestulkoon kaikkia tuotteita markkinoidaan kohdennetusti. Internetin vahvuus verrattuna muuhun mediaan onkin sen mukanaan tuomat mahdollisuudet kohdentaa mainontaa yksilöllisesti ja tarkemmin kuin perinteisen median avulla. Internetmainonnan suosiota selittää myös luultavasti sen mahdollistamat tekniikat ”seurata” mainoksen nähneen toimintaa mainoksen näkemisen jälkeen. Mainostajan kannalta on tehokasta, että voidaan erotella mainoksen nähneistä ne, jotka saapuivat yrityksen sivulle mainoksen kautta (*pay-per-impression*) ja toisaalta ne, jotka ostivat yrityksen tuotetta tai palvelua nähtyään mainoksen (*pay-per-conversion*). Näistä tavoista mainostaja voi valita tarpeitansa vastaavan mainostamistavan tilanteen mukaan.

4. Web-tiedonlouhinta mainontaa varten

4.1 Web-tiedonlouhinnan lähteet

Tiedonlouhinnan avulla etsitään implisiittistä, mutta potentiaalisesti käyttökelpoista informaatiota [Shaw et al., 2001]. Tiedonlouhinta on iteratiivinen prosessi, joka koostuu tiedon valitsemisesta, tutkimisesta ja mallintamisesta. Suuri osa web-tiedonlouhinnan kaupallisista sovelluksista hyödyntää erilaisia tilastollisia menetelmiä koneoppimis- ja tiedonlouhintamenetelmien lisäksi. Erityisesti internetin käytön analysointi on nykyisin keskeinen tutkimusalue [Facca and Lanzi, 2005]. Usein saman ongelman ratkaisuun voidaan käyttää useita eri tiedonlouhinnan tekniikoita tai yhdistellä niitä.

Internet on valtava tiedonlähde, josta on saatavilla monenlaista tietoa kaupallisiin tarkoituksiin. Web-tiedonlouhinnalla tarkoitetaan potentiaalisen tiedon louhimista internetistä. Internetin sisältö (*web content*) käsittää miljardeja sivuja. Internetin käytöstä (*web usage*) tallentuu tietoa lokitiedostoihin päivittäin. Sisällön louhinta keskittyy internetissä olevaan raakadataan, joka on käytännössä tekstiä ja sivuston toteutuksessa käytettyjä HTML-tageja. Internetin rakenteen (*web structure*) louhinta tutkii internetin rakennetta. Rakenteen louhinnassa hyödynnetään sivuilta toisille johtavia hyperlinkkejä. [Facca and Lanzi, 2005]

Sisällön louhintaa sovelletaan sisällön kategorisoinnissa ja järjestämisessä. Rakenteen louhinnan avulla voidaan tehdä linkkiperustaista kategorisointia ja sisällön sekä rakenteen louhinnan yhdistelmällä pyritään mallintamaan internetin rakennetta. Käytön louhinnan tekniikoita hyödynnetään web-personalisoinnissa, mukautuvien internetsivujen suunnittelussa ja käyttäjien mallintamisessa. Mainonnan kannalta juuri käytön louhinta tuottaa erityisen kiinnostavaa tietoa. [Facca and Lanzi, 2005]

Internetin käytön louhintaa voidaan pitää erityisen oleellisena osa-alueena internetmainonnan kannalta, joten seuraavaksi esitellään käytön louhinnassa hyödynnettäviä tiedonlähteitä vielä tarkemmin. Srivastava ja muut [2000] jaottelevat tutkittavan tiedon abstraktioihin, jotka ovat käyttäjä, palvelin, istunnot, episodit, klikkausvirrat ja sivunäkymät. Internetin käytön tutkimisessa oleellista on yksittäisten istuntojen (*sessions*) tunnistaminen, jolloin päästään tutkimaan yksittäisen käyttäjän toimintaa sivuilla. Istunto tarkoittaa käyttäjän vierailua internetsivustolla. Käyttäjällä (*user*) tarkoitetaan yksittäistä henkilöä, joka käyttää internetiä selaimella. Klikkaamalla sivun linkkiä tai kirjoittamalla selaimensa osoiteriville sivun osoitteen käyttäjä lähettää pyynnön saada sivunäkymä (*page view*). Sivunäkymä koostuu tekstistä, grafiikasta ja skripteistä. Kun yksittäinen käyttäjä on onnistuttu tunnistamaan, siirrytään tutkimaan käyttäjän

klikkausvirtoja (*click-streams*), eli useita peräkkäisiä sivunäkymäpyyntöjä. Klikkausvirtoja muodostuu, kun käyttäjä liikkuu sivulta toiselle. Episodilla (*episode*) tarkoitetaan mitä tahansa merkityksellistä ryhmää istuntoja.

Käytön louhinnan lähteet jaetaan kolmeen kategoriaan: internetpalvelin (*web server*), välityspalvelin (*proxy server*) ja asiakas (*client*) [Facca and Lanzi, 2005]. Srivastava ja muut [2000] lisäävät näiden kolmen lähteen lisäksi listalle vielä organisaatioiden omat tietokannat, jotka sisältävät tietoa liiketoiminnasta tai sulautettua tietoa internetistä. Internetpalvelin tarkoittaa web-palvelinta, jolla internetsivu sijaitsee. Välityspalvelin tarkoittaa palvelinta, joka välittää tietoa asiakkaan ja internetpalvelimen välillä. Asiakkaalla tarkoitetaan internetselainta.

Internetpalvelimen lokitiedostoihin tallentuu tavallisesti tieto IP-osoitteesta, sivustolla vierailun päivämäärä ja kellonaika sekä käyttäjän klikkausvirta (*click stream*) [Facca and Lanzi, 2005]. Internetin palvelinlokissa tieto on tallennettuna johonkin standardiformaattiin kuten *Common log format* tai *Extended log format*. Palvelimen lokitietoja hyödynnettyäessä oleellista on erityisesti yksittäisten istuntojen tunnistaminen. Yleinen keino istuntojen tunnistamisen helpottamiseksi on käyttää identifioivia evästeitä (*cookies*). Eväste on tieto, jonka palvelin lähettää selaimelle. Eväste tallentuu käyttäjän koneelle ja internetpalvelin pyytää sen käyttäjän saapuessa uudestaan sivustolle ja tallentaa yhdessä muiden lokitietojen kanssa [Facca and Lanzi, 2005]. Jos evästeiden käyttö ei ole mahdollista, voidaan käyttää myös erilaisia heuristiikkoja istuntojen identifioimiseksi. Käyttäjän toimintaa voidaan tutkia myös harvemmin käytettyjen sniffereiden (*packet sniffers*) avulla. Jos on mahdollista vaatia käyttäjän rekisteröityminen ja kirjautuminen aina sivua käytettäessä, helpottuu käyttäjän toiminnan seuraaminen huomattavasti, koska tällöin tieto istunnoista ja käyttäjistä on automaattisesti saatavilla [Facca and Lanzi, 2005]. Esimerkiksi YouTubeissa palveluun kirjautuneen käyttäjän kiinnostuksen kohteista voidaan kerätä tietoa tallentamalla käyttäjän tekemiä hakuja ja käyttäjän katsomien videoiden aihealueita ja personalisoida mainontaa tietojen perusteella.

Toinen lähde löytää tietoa käyttäjän toimista on välityspalvelin. Välityspalvelimet toimivat internetpalvelimen ja selaimen välissä tarjoten välimuistia [Srivastava et al., 2000]. Välityspalvelin varastoi internetissä siirrettäviä tiedostoja, jolloin navigointinopeus tehostuu. Käytännössä tiedonkeruu on lähes samanlaista kuin internetpalvelimelta louhittaessa. Käyttäjien identifiointi on josain määrin helpompaa kuin internetpalvelimelta louhittaessa, koska välityspalvelimen ja asiakkaan välissä ei ole välimuistia [Facca and Lanzi, 2005]. Edelleen haasteellisinta on yksittäisten istuntojen tunnistaminen, koska kaikkia käyttäjän navigointipolkuja ei saada tunnistettua.

Kolmas vaihtoehto kerätä käyttäjistä tietoa on asiakas eli selain. Selaimesta voidaan kerätä tietoa ”etäagenttien” (*remote agents*) kuten Javascriptin tai Java-applettien avulla tai muokkaamalla käytettävissä olevien selainten lähdekoodia [Srivastava et al., 2000]. Selaimesta kerätty tieto on yksityiskohtaista ja sisältää tarkkaa tietoa käyttäjän toimista [Facca and Lanzi, 2005]. Ongelmana on kuitenkin se, että toiminta on pitkälti riippuvaista käyttäjän yhteistyöstä. Eettiseksi ongelmaksi muodostuu käyttäjän oikeus yksityisyyteen ja toisaalta kaupallinen tarve tiedonkeruulle.

4.2 Raakadatan esikäsittely

Eniten aikaa vievä osuus internetin käytön louhinnassa on raakadatan esikäsittely sellaiseen muotoon, että siihen voidaan soveltaa tiedonlouhinnan tekniikoita. Esikäsittely koostuu neljästä osa-alueesta [Facca and Lanzi, 2005]:

1. tiedon puhdistus (*data cleaning*)
2. käyttäjän istuntojen tunnistaminen (*the identification of users' sessions*)
3. tiedonhaku sivun rakenteesta ja sisällöstä (*the retrieving of information about page content and structure*)
4. tiedon muotoilu (*data formatting*).

Tiedon puhdistuksen vaiheessa poistetaan kaikki tiedonlouhinnan tarkoituksen perusteella epärelevantti tieto. Puhdistusvaiheessa poistetaan esimerkiksi robottien sivukäynneistä tallentunut tieto sekä sivustolla olevan grafiikan latauspyynnöt [Facca and Lanzi, 2005]. Esikäsittelyvaiheessa saadaan karsittua varsinaiseen tiedonlouhintaan käytettävän materiaalin määrää pienemmäksi.

Istuntojen tunnistaminen ja jäljittäminen on seuraava ja hyvin oleellinen vaihe. Tässä vaiheessa pyritään tunnistamaan yksittäiset istunnot ja niiden avulla tunnistamaan istuntojen sisäiset klikkausvirrat. Mikäli istuntoja ja käyttäjiä ei ole kyetty tunnistamaan muilla tavoin, täytyy se tehdä tässä vaiheessa lokitiedostoihin tallennetun tiedon perusteella. Lokitietoihin on tallentuneena vain käyttäjän IP-osoite, sivustolla vierailun päivämäärä ja kellonaika sekä käyttäjän klikkausvirta. Tehtävänä on yhdistää klikkausvirta yksittäiseen käyttäjään ja yksittäisen käyttäjän yksittäiseen istuntoon, jotta päästään tutkimaan käyttäjän toimintaa sivulla.

Srivastava ja muut [2000] luettelevat useita ongelmia, joita kohdataan istuntojen tunnistamisen vaiheessa. Lokitiedoissa voi olla puutteita, jolloin istuntojen tunnistaminen hankaloituu. Lokitietoihin voi olla tallentuneena yksi IP-osoite, johon liittyy useita istuntoja, tai useita IP-osoitteita, joihin liittyy yksi istunto [Srivastava et al., 2000]. Nämä aukot palvelinlokeissa johtuvat usein välityspalvelimen tai selaimen välimuistista, koska välimuistista ladatut sivunäkymät eivät tallennu lokitietoihin [Facca and Lanzi, 2005]. Esimerkiksi selaimen takai-

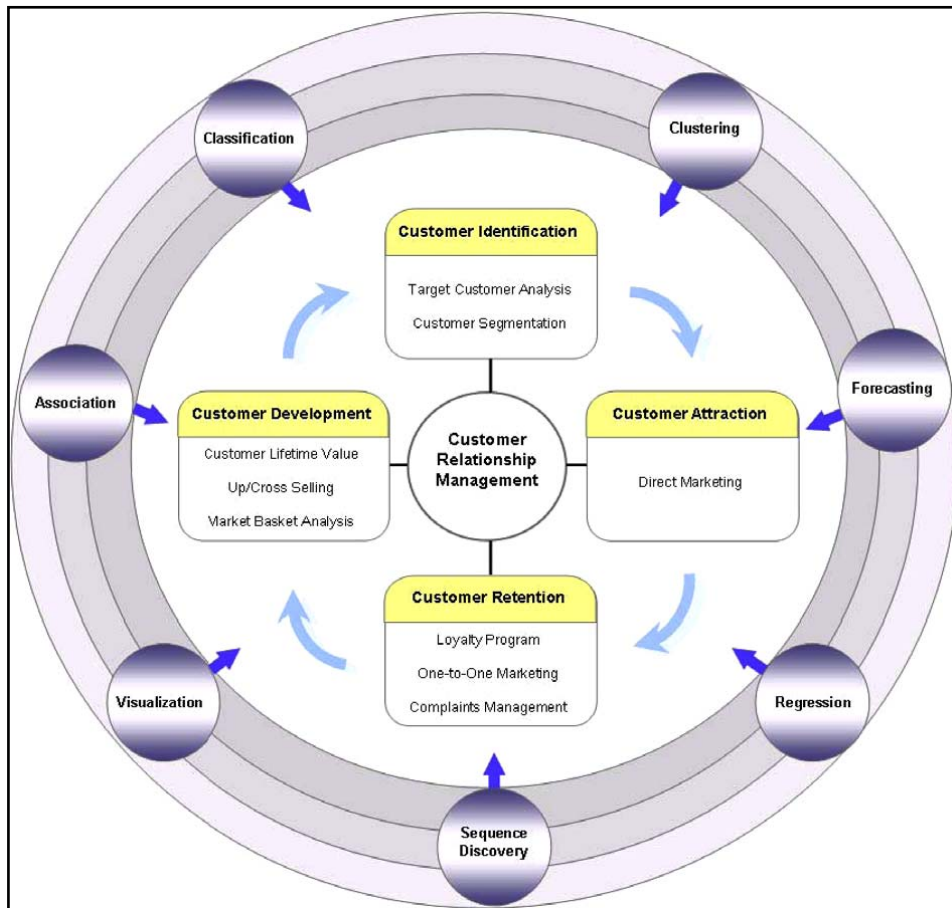
sin-painikkeen käytöstä ei tallennu tietoa palvelinlokiin, koska sivunäkymä ladataan välimuistista. Tällöin klikkausvirrassa näyttäisi olevan aukkoja, jotka pyritään esikäsittelyvaiheessa täyttämään. Toinen ongelma on, että yhteen käyttäjään voi liittyä useita IP-osoitteita, mikäli käyttäjä käyttää sivustoa eri päätteiltä. Käyttäjä voi myös vaihdella käyttämäänsä selainta, jolloin yhteen käyttäjään näyttää liittyvän useita selaimia [Srivastava et al., 2000].

Kolmas vaihe esikäsittelyssä on tiedonhaku sivuston sisällöstä ja rakenteesta. Tämä vaihe on tehtävä, jotta ymmärretään paremmin tiedonlouhinnan tuloksia. Sivuja voidaan kategorisoida niiden sisällön mukaan ja hyödyntää saatua tietoa tiedonlouhinnan vaiheessa. Mikäli sivujen luokittelua ei voida riittäväällä tarkkuudella tehdä etukäteen, voidaan web-rakenteenlouhinnan tekniikoita hyödyntää luokittelun kehittämiseksi. Sivujen sisällön luokittelun avulla voidaan luoda yleistettyjä malleja käyttäjän klikkausvirrasta sivuilla. Näitä yleisiä malleja voidaan käyttää hyväksi käyttäjän mallintamisessa (*user modeling*). [Facca and Lanzi, 2005]

Viimeinen vaihe esikäsittelyssä on tiedon muotoilu. Tässä vaiheessa tiedonlouhintaa varten kerätty tieto pyritään tallentamaan sellaiseen muotoon, että siihen voidaan käyttää tiedonlouhinnan tekniikoita. Oleellista on, että tieto olisi tallennettuna sellaiseen muotoon, että siihen on helppo tehdä kyselyitä [Facca and Lanzi, 2005]. Esimerkiksi erilaiset puurakenteet mahdollistavat usein tehokkaiden kyselyiden tekemisen. Facca ja Lanzi [2005] mainitsevat WAP-puun ja FBP-puun, joita voidaan hyödyntää tässä viimeisessä esikäsittelyn vaiheessa. Puurakenteisiin tallennettua tietoa hyödynnetään sekvenssien tunnistamisessa.

5. Web-tiedonlouhinnan tekniikat mainontaa varten

Kuvassa 1 näkyy, kuinka tiedonlouhinnan tekniikoita voidaan soveltaa asiakkuudenhallinnan vaiheissa. Luokittelua ja klusterointia hyödynnetään erityisesti asiakkaan identifioimisessa. Ennustamista hyödynnetään suoramarkkinoinnin vaiheessa. Regressiota ja sekvenssien tunnistamista käytetään hyväksi asiakkaan säilyttämisen vaiheessa. Assosiaatiosääntöjä hyödynnetään asiakkuuden kehittämisen vaiheessa. Datan visualisointia hyödynnetään syklin loppupuolella, jolloin tiedonlouhinnalla on saatu tietoa, jonka esittäminen visuaalisessa muodossa auttaa hahmottamaan tulokset helposti. Usein samaan tiedonlouhintatehtävään voidaan kuitenkin hyödyntää monia tiedonlouhinnan tapoja ja tekniikoita.



Kuva 1. Tiedonlouhinta asiakkuudenhallinnassa [Ngai et al., 2009].

5.1 Assosiaatioanalyysi

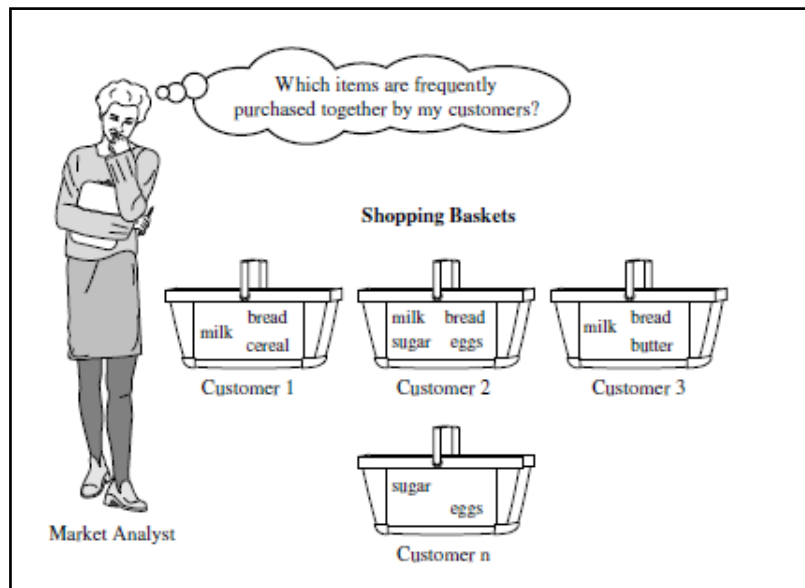
Assosiaatiolla tarkoitetaan suhdetta samassa yhteydessä esiintyvien asioiden välillä [Ngai et al., 2009]. Web-tiedonlouhinnassa assosiaatioanalyysin (*association analysis*) avulla pyritään löytämään yhteyksiä eri sivujen välillä. Assosiaatioanalyysin avulla voidaan niputtaa yhteen sivuja, jotka esiintyvät yhdessä yksittäisten istuntojen aikana, esimerkiksi niin, että vierailu sivulla A.html ja B.html johtaa hyvin todennäköisesti vierailuun sivulla C.html kyseisen istunnon aikana [Facca and Lanzi, 2005]. Sähköisessä kaupankäynnissä assosiaatioanalyysin avulla tutkitaan ostotapahtumien muodostumista ja tehdään ostoskorianalyysiä. Ostoskorianalyysin avulla voidaan löytää yhteyksiä eri tuotteiden ostotapahtumien välillä ja hyödyntää tätä tietoa toisiinsa liittyvien tuotteiden markkinointistrategioiden kehityksessä [Ngai et al., 2009]. Kuvassa 2 on esimerkki ostoskorianalyysistä, jossa on löydetty yhteys maidon ja leivän sekä kananmunien ja sokerin ostotapahtumien välillä.

Ostoskorianalyysissä assosiaatioanalyysin avulla saadaan laskettua tuki (*support*) ja luottamus (*confidence*) kahden tai useamman tuotteen ostotapahtumien välisestä yhteydestä [Han and Kamber, 2006]. Tuki tarkoittaa assosiaatioanalyysin perusteella saatua tulosta siitä, että asiakkaan ostaessa tuotteen X hän ostaa myös tuotteen Y. Luottamus tarkoittaa todennäköisyyttä sille, että jos asiakas ostaa tuotteen X hän ostaa myös tuotteen Y. Assosiaatioanalyysin avulla voidaan saada esimerkiksi seuraava assosiaatiosääntö [Han and Kamber, 2006]:

tietokone -> virustorjuntaohjelma [tuki = 1%, luottamus 50%]

Tulos tarkoittaa, että analyysin syötteenä olleista ostotapahtumista 1% esiintyi yhdessä sekä tietokoneen että virustorjuntaohjelman ostotapahtuma. ”Luottamus 50%” tarkoittaa, että 50% tietokoneen ostaneista osti myös virustorjuntaohjelman. Tavallisesti molemmille arvoille asetetaan jokin minimivaatimus, jonka täyttyessä tulosta voidaan pitää oleellisena tehdyn tiedonlouhinnan tarkoituksen kannalta [Han and Kamber, 2006].

Assosiaatioanalyysissä voidaan hyödyntää myös useita attribuutteja, esimerkiksi siten, että mukaan otetaan asiakkaista demografista tietoa. Ostotapahtumia voidaan yhdistää demografiseen tietoon, kuten asiakkaan ikään, asuinpaikkakuntaan tai tulotasoon. Näin tehtäessä voidaan tehdä johtopäätelmiä erityyppisten asiakasryhmien ostokäyttäytymisestä. Voidaan löytää esimerkiksi yhteys 20–29-vuotiaiden 20 000–29 000 euroa ansaitsevien ja tietynlaisen cd-soittimen ostaneiden väliltä [Kamber and Han, 2006]. Tällaisen tiedon hyödyntäminen mainonnassa on todennäköisesti tuottoisaa, kun mainoksia voidaan kohdentaa otolliselle asiakaskunnalle. Assosiaatioanalyysissä hyödynnetään Apriori-algoritmia (*Apriori algorithm*) ja sen erilaisia variaatioita [Srivastava et al., 2000].



Kuva 2. Esimerkki ostoskorianalyysistä, jossa pyritään löytämään yhteyksiä samaan ostotapahtumaan liittyvien tuotteiden välillä. [Han and Kamber, 2006].

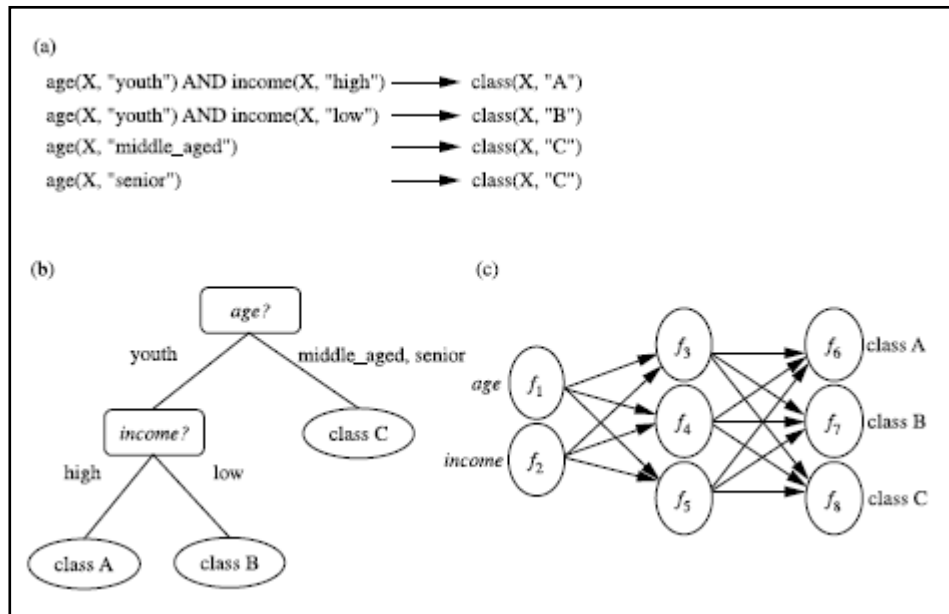
5.2 Luokittelu

Luokittelu (*classification*) tarkoittaa asiakkaiden luokittelua ryhmiin, jotka ovat ennalta määrätty [Shaw et al., 2001]. Web-tiedonlouhinnassa ollaan kiinnostuneita erilaisten käyttäjäprofiilien muodostamisesta. Jotta käyttäjäprofiilien tai käyttäjäryhmien muodostaminen olisi mahdollista, täytyy tietomassasta kyetä louhimaan ja valitsemaan kategorian yhteenkuuluvuutta parhaiten osoittavat ominaisuudet [Srivastava et al., 2000].

Käyttäjät voidaan luokitella esimerkiksi ryhmiin "vain sähköpostin käyttäjät", "todelliset surffaajat" ja "hupisurffaajat" lokitietojen perusteella [Shaw et al., 2001]. Luokittelun tarkoituksena on rakentaa malli, joka ennustaa tulevaisuuden asiakkaiden käytöstä jakamalla tiettyjen kriteerien perusteella tietokantatietueet luokkiin [Ngai et al., 2009]. Markkinointitutkimuksessa luokittelun avulla pyritään ennustamaan ihmisten käyttäytymistä, jolloin eri luokille voidaan suunnata erilaisia mainoksia. Hanin ja Kamberin [2006] mukaan mainoskampanjoiden tehoa voidaan testata luokittelun avulla. Tutkimalla eri luokkien vastetta mainoskampanjalle saadaan selville, mitkä tekijät ovat asiakkaille tuotteessa tärkeitä ja voidaan toteuttaa tehokkaampia mainoskampanjoita.

Yleisimmät työkalut luokitteluun ovat neuroverkot (*neural networks*), päätöspuut (*decision trees*) ja jos-niin -säännöt (*if-then rules*) [Ngai et al., 2009]. Nämä työkalut on esitetty kuvassa 3. Jos-niin -sääntöjen avulla tehdään johtopäätelmiä siitä, mihin luokkaan henkilö kuuluu. Päätelyssä voi olla mukana yksi tai useampi attribuutti, jonka avulla päätelmä tehdään. Päätöspuut toimivat jokseenkin samaan tapaan. Puun sisäsolmuissa on testi, joka attribuuteille teh-

dään. Puuta kuljetaan saatujen tulosten perusteella, kunnes päädytään lehteen, jossa on määritelty luokka, johon henkilö kuuluu. Neuroverkot koostuvat neuronien kaltaisista prosessointiyksiköistä, jotka ovat yhdistettynä toisiinsa painotettuina. Neuroverkon läpikäymisen jälkeen saadaan lopulta luokka, johon henkilö kuuluu.



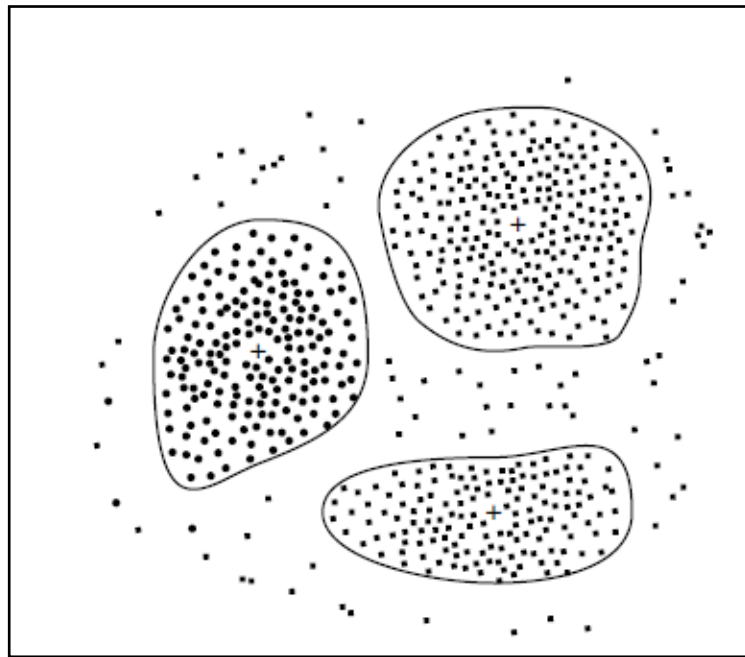
Kuva 3. Esimerkki luokittelun työkaluista a) jos-niin -säännöt b) päätöspuu c) neuroverkko [Han and Kamber, 2006].

5.3 Klusterointi

Klusteroinnilla (*clustering*) tarkoitetaan heterogeenisen populaation segmentointia useaan homogeeniseen klusteriin [Ngai et al., 2009]. Klusteri on siis ryhmä, jolla on jokin samankaltainen ominaisuus klusterin sisällä, mutta klusterit eroavat keskenään toisistaan. Luokittelu ja klusterointi eroavat toisistaan siten, että luokittelussa tiedetään ennalta, mihin luokkiin tapaukset kuuluvat. Klusteroinnissa sen sijaan luokka- tai klusteritietoa ei ole ennalta, vaan tietomassaa louhimalla etsitään siinä esiintyviä luonnollisia ryhmiä eli klustereita.

Klusterointia voidaan tehdä sekä käyttäjistä että internetsivuista [Srivastava et al., 2000]. Käyttäjiä voidaan klusteroida esimerkiksi heidän internetin selaustapojensa perusteella, jolloin ryhmitellään käyttäjiä selaustavaltaan samankaltaisiin ryhmiin. Tällaisen käyttäjiä yhdistävän tiedon löytäminen on oleellista erityisesti tiedon personalisointia ja internetkaupan markkinoiden segmentointia ajatellen [Srivastava et al., 2000]. Sivuja klusteroimalla voidaan ryhmitellä sivustoja sen mukaan, onko niillä samankaltaista sisältöä [Srivastava et al., 2000]. Tällainen tieto on tärkeää hakukoneiden toiminnan kannalta ja siten oleellista myös internetmainontaa suunniteltaessa ja toteutettaessa.

Klusteroinnissa koetetaan maksimoida klusterin sisällä oleva yhdenmukaisuus ja minimoida yhdenmukaisuus eri klustereiden välillä [Han and Kamber, 2006]. Esimerkiksi asiakkaiden sijaintitietojen perusteella tehtyä klusterointia voidaan hyödyntää kohdennetussa mainonnassa, jolloin kivijalkaliikkeen palveluita mainostetaan vain sellaisille asiakkaille, joilla on sijaintinsa puolesta mahdollisuus vierailla liikkeessä. Kuvassa 4 on esitetty sijaintitietojen perusteella tehdyn klusteroinnin tulos visuaalisessa muodossa. Yleisimpiä välineitä klusterointiin ovat hierarkinen klusterointi (*hierarchical clustering*) ja k :n keskiarvon klusterointimenetelmä (*k-means algorithm*) [Han and Kamber, 2006].



Kuva 4. Visuaalisessa muodossa esitetty sijaintitietojen perusteella tehdyn klusterointiprosessin tulos [Han and Kamber, 2006].

5.4 Ennustaminen ja regressio

Ennustamisen (*forecasting*) avulla koetetaan estimoida jonkin ominaisuuden tulevaisuuden arvoa tiedonlouhinnasta saadun tiedon avulla [Ngai et al., 2009]. Ennustamisessa hyödynnetään siis tietoa nykyisestä tilanteesta koetettaessa ennustaa tulevaisuuden trendejä. Esimerkiksi tulevaisuuden kysyntää voidaan ennustaa nykyisten markkinatietojen perusteella [Ngai et al., 2009]. Siinä missä luokittelu käsittelee diskreettiä dataa, ennustaminen keskittyy järjestysasteikollisen tai kvantitatiivisen muuttujan arvojen käsittelyyn [Han and Kamber, 2006]. Ennustamista käytetään esimerkiksi puuttuvan tai saavuttamattoman tiedon päättelyyn. Osana markkinointistrategiaa ennustaminen on oleellisessa asemassa, jotta mainoskampanjat osataan ajoittaa oikeaan aikaan ja toteuttaa oikealla tavalla. Ennustamiseen käytettäviä työkaluja ovat neuroverkot (*neural*

networks), elinaika-analyysi (*survival analysis*) ja regressio (*regression*) [Ngai et al., 2009].

Regressio on tilastollinen menetelmä, jonka avulla tarkastellaan vastemuuttujan riippuvuutta valituista selittävistä muuttujista. Regression avulla mallinetaan syy-seuraussuhteita ja testataan tieteellisiä hypoteeseja muuttujien välisistä suhteista. Regression tutkimiseen käytetyt työkalut ovat lineaarinen regressio (*linear regression*) ja logistinen regressio (*logistic regression*). [Ngai et al., 2009]

5.5 Sekvenssien tunnistaminen

Sekvenssien tunnistamisella (*sequence discovery*) tarkoitetaan yhteyksien tunnistamista silloin, kun aika on merkitsevä [Ngai et al., 2009]. Sekvenssillä tarkoitetaan tässä yhteydessä säännönmukaista tapahtumasarjaa. Samoin kuin assosiaatiosääntöjen tunnistamisen yhteydessä, ollaan sekvenssien tunnistamisessa kiinnostuneita sivuista, jotka esiintyvät yhdessä. Toisin kuin assosiaatiosääntöjen kohdalla, sekvenssien tunnistamisessa ollaan lisäksi kiinnostuneista sivuilla vierailujen ajankohdasta. Esimerkiksi niin, että jos käyttäjä *ensiksi* vierailee sivulla A.html ja *sitten* sivulla B.html, ja tämän lisäksi vierailee C.html saman istunnon aikana [Facca and Lanzi, 2005].

Sekvenssejä voidaan tunnistaa esimerkiksi ostoskäyttäytymisestä ja käyttäjän klikkausvirroista [Han and Kamber, 2006]. Sekvenssien tunnistamisen avulla mainostajat voivat ennustaa tulevaisuuden sivuilla vierailuja ja sijoitella mainoksia sen mukaan [Srivastava et al., 2000]. Sekvenssihakmo voi olla vaikkapa sellainen, että asiakkaan ostaessa Canonin digitaalisen kameran hän todennäköisesti ostaa kuukauden kuluessa HP:n väritulostimen [Han and Kamber, 2006]. Sekvenssien tunnistaminen on hyödyllistä kohdennetussa mainonnassa ja asiakkaan säilyttämisessä [Han and Kamber, 2006]. Sekvenssihakmojen tunnistamisen avulla voidaan päästä myös menetettyjen asiakkaiden jäljille ja koettaa päätellä, miksi asiakas menetettiin ja saadun tiedon avulla kehittää asiakkuudenhallintaa. Sekvenssien tunnistamisen avulla voidaan huomata yhteyksiä tiettyjen ajankohtien ja ostokäyttäytymisen välillä. Esimerkiksi vuodenaikojen vaihtelu voi vaikuttaa tuotteiden menekkiin [Han and Kamber, 2006]. Sekvenssien tunnistamisessa hyödynnetään esimerkiksi GSP-, SPADE- ja Prefix Scan -algoritmeja [Han and Kamber, 2006].

5.6 Visualisointi

Visualisoinnilla (*visualization*) tarkoitetaan tiedonlouhinnassa löydetyn datan esittämistä visuaalisessa muodossa. Visualisointia hyödynnetään etenkin tulos-

ten analysointivaiheessa, jotta löydetty riippuvuussuhteet ja mallit huomattaisiin. Visualisoinnissa tiedonlouhinnan tulokset esitetään esimerkiksi diagrammeina tai kuvina. Kun tiedonlouhinnan tulokset on nähtävillä visuaalisessa muodossa, on mahdollisesti löytyneet poikkeamat ja riippuvuussuhteet helppo huomata [Shaw et al., 2001]. Visualisoinnissa hyödynnetään esimerkiksi 3D-grafiikkaa [Srivastava et al., 2000].

6. Asiakassegmenttien generointi selaushistoriatietojen perusteella: esimerkki Yagoon tutkimusryhmän tutkimuksesta

Aly ja muut [2012] esittelevät tutkimuksessaan yhden tavan segmentoida internetkäyttäjiä mainontaa varten. Aly ja muut ovat huomanneet aiemmissa tutkimuksissaan, että mainoksen klikkausten maksimointi ei johda maksimaaliseen määrään konversioita (*conversion*) eli ostotapahtumia. Tämän takia he pyrkivät erityisesti siihen, että mainokset näytetään vain sellaiselle asiakassegmentille, että mainoksen näyttäminen johtaa todennäköisesti ostotapahtumaan. Käyttäjär ryhmien segmentoinnin perusteena tutkimuksessa keskitytään käyttäjän internetin selaushistoriaan.

Tutkimuksessa tavoitteena on kampanjakohtainen kustomointi siten, että yksittäisille mainoskampanjoille löydetään oikeanlainen asiakaskunta. Mainoskampanjat ovat *pay-per-conversion* -tyyppisiä, eli mainostaja maksaa julkaisijalle vain, mikäli mainoksen klikkaus johtaa ostotapahtumaan. Haasteena on löytää kullekin keskenään erilaiselle mainoskampanjalle oikeanlainen asiakassegmentti ja toisaalta luoda asiakassegmenttejä käyttäjien päivittäin muuttuvien historiatietojen perusteella.

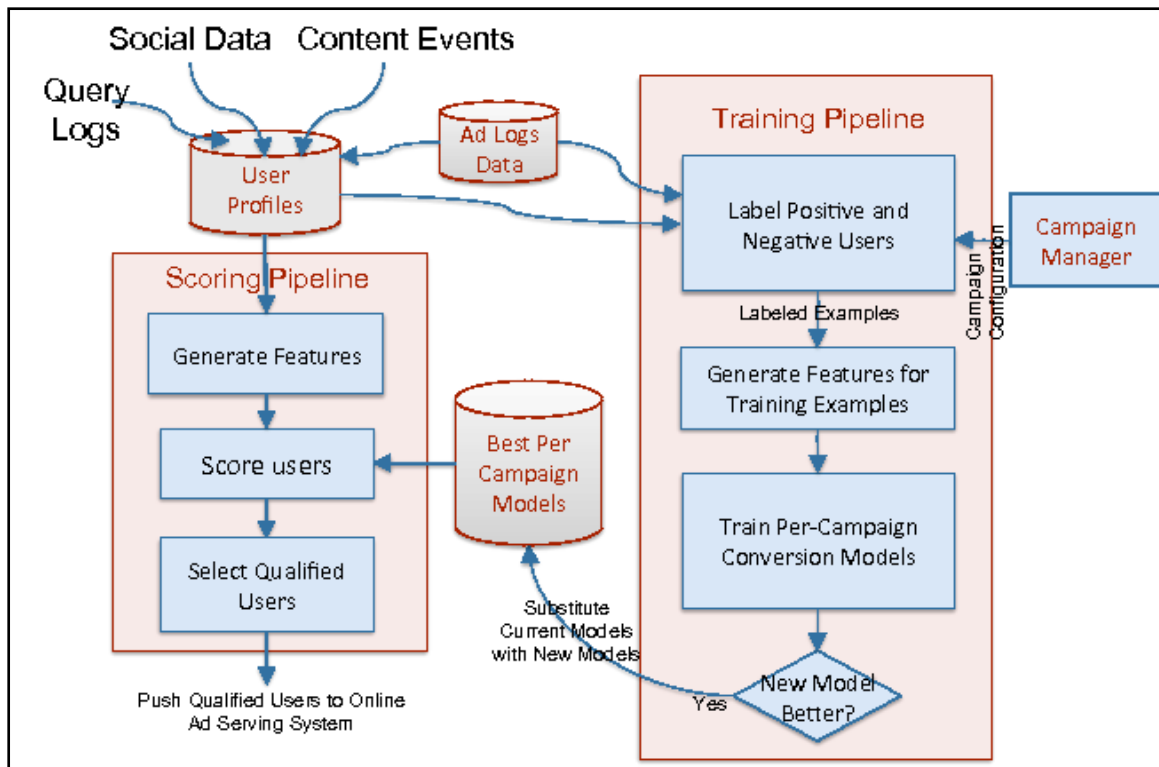
Tutkimuksessa määritellään tavoiteaika (*target time*), jonka aikana käyttäjälle osoitetaan kohdennettua mainontaa ja seurataan, johtaako mainoksen näyttäminen konversioon. Tavoiteajan avulla määritellään *positiivinen esimerkki* ja *negatiivinen esimerkki* kuvaamaan sitä, onnistuiko mainoksen kohdentaminen vai ei. Positiivinen esimerkki tarkoittaa tilannetta, jossa mainoksen näyttäminen johtaa konversioon tavoiteajassa. Negatiivinen esimerkki sen sijaan tarkoittaa tapahtumaa, joka ei johda konversioon tavoiteajassa.

Aly ja muut määrittelevät käyttäjien toimintaa internetin selaushistoriatietojen perusteella. Mainostajan kannalta käyttäjän toiminta on joko *aktiivista* tai *passiivista*. Käyttäjän toiminta määritellään passiiviseksi, mikäli käyttäjä näkee mainoksia ja vierailee sivuilla, mutta vierailu sivulla ei vaadi erityistä aktiivisuutta. Käyttäjän toiminta on aktiivista, mikäli hän on tehnyt hakuja ja klikannut mainosta päästäkseen sivulle. Aktiivisten ja passiivisten tapahtumien tutkiminen on Alyn ja muiden aiemman tutkimustyön perusteella erityisen tärkeätä määriteltäessä käyttäjän alttiutta ostotapahtumaan.

Aly ja muut määrittelevät kolme erityyppistä tapahtumaa, joista kerätään tietoa: sivut, joilla on vierailtu, käyttäjän tekemät haut sekä mainokset. Sivut, joilla käyttäjä on vieraillut, klusteroidaan muutamaaan klusteriin sivun sisällön aiheen mukaan. Klusterista tallennetaan identifioiva tunnus ja sivun kategoria. Hakukyselyistä tallennetaan haetut asiat, hakulinkkien klikkaukset ja hakutulosten yhteydessä esitettyjen mainosten klikkaukset. Näistä voidaan louhia kategoria sekä tehdyille hauille että tehdyille klikkauksille. Mainoksesta tallennettavia tietoja ovat tieto mainosten näytöistä sekä mainosten klikkauksista ja mainoksen tunnus. Yhdistelemällä näiden kolmen osa-alueen tietoja saadaan luotua käyttäjäprofiileita, joissa käyttäjän kiinnostuksen kohteet on määritelty internetin käyttöhistorian perusteella.

Käyttäjäprofiilit eivät ole staattisia, sillä ne muuttuvat aina käyttäjän käyttäessä internetiä ja vierailllessa uusilla sivuilla. Tämän vuoksi käyttäjäprofiilien päivittäminen on tärkeää. Aly ja muut päätyvät päivittämään käyttäjäprofiileita joka päivä, jotta tieto olisi mahdollisimman ajantasaista.

Kuvassa 5 näkyy Alyn ja muiden kehittämän menetelmän kokonaisrakenne yleisellä tasolla. Siinä hyödynnetään koneoppimista (*machine learning*), jonka avulla järjestelmä kehittää mainosten kohdentamisen tarkkuutta jatkuvasti käyttäen hyväksi tietoa aiemmista ostotapahtumaan johtaneista mainosten näytöistä sekä luotuja käyttäjäprofiileita. Käyttäjäprofiilien luontiprosessissa (*user profiles*) syötteenä on hakukyselyitä, sosiaalista dataa sekä käyttäjän vierailemien sivujen sisältötietoa. Käyttäjäprofiilien pisteytysprosessissa (*scoring pipeline*) valitaan kullekin mainokselle oikea kohderyhmä yhdistämällä tietoa luoduista käyttäjäprofiileista ja koneoppimisen tuloksena saatuja malleja siitä, millaiset käyttäjät ovat otollista kohderyhmää mainokselle. Tavoitteena on parantaa erityisesti ostotapahtumaan johtaneiden mainosnäyttöjen määrää, ja siinä myös tutkimusasettelussa onnistuttiin.



Kuva 5. Alyn ja muiden [2012] kehittämän mainosten kohdentamisen menetelmän kokonaisrakenne.

8. Yhteenveto

Internetmainonta on kehittynyt paljon viime vuosikymmenen aikana. Ihmisten internetin käyttöä tutkimalla saadaan paljon tietoa heidän kiinnostuksen kohteistaan ja tätä tietoa hyödynnetään erilaisten markkinointikampanjoiden toteutuksessa. Internetmainontaa varten tehtyä tiedonlouhintaa voidaan tehdä monella tapaa ja eri tekniikoita yhdistellen. Viimeisen vuosikymmenen aikana internetmainosten kohdentamisen menetelmät ovat kehittyneet kovaa vauhtia ja tulevat kehittymään todennäköisesti jatkossakin. Internetin käytön perusteella tehtävään asiakaskunnan segmentointiin ja mainosten personalisointiin liittyy yksityisyyden näkökulmasta eettisiä ongelmia, joiden huomioonottaminen on tulevaisuudessa tärkeää.

Tämän tutkielman tarkoitus on luoda yleiskatsaus tiedonlouhintaan sovel-lusalueena mainonta. Kovin yksityiskohtainen tiedonlouhintatekniikoiden esitely ei ole mahdollista kandidaatintutkielmassa, minkä takia aihetta on esitelty melko yleisellä tasolla.

Viiteluettelo

- [Aly et al., 2012] Mohamed Aly, Andrew Hatch, Vanja Josifovski and Vihay K. Naryanan, Web-scale user modelling or targeting. In: *Proceedings of the 21st International Conference Companion on World Wide Web* (2012), 3-12.
- [Facca and Lanzi, 2005] Federico Michele Facca and Pier Luca Lanzi, Mining interesting knowledge from weblogs: a survey. *Data and Knowledge Engineering* **53**, (2005) 225-241.
- [Deshpande et al., 2014] Nishad Deshpande, Shabib Ahmed and Alok Khode, Web based targeted advertising: A study based on patent information. *Procedia Economics and Finance* **11**, (2014) 522 – 535.
- [Han and Kamber, 2006] Jiawei Han and Micheline Kamber *Data mining: Concepts and Techniques*. Morgan Kaufmann Publishers, 2006.
- [Muthukrishnan et al., 2010] S.Muthukrishnan and Rutgers U. and Google Inc. Data management and mining in internet ad systems. In: *Proceedings of the VLDB Endowment* **3**, (2010), 1655-1656.
- [Ngai et al., 2009] E.W.T. Ngai, Li Xiu and D.C.K. Chau, Application of data mining techniques in customer relationship management: A literature review and classification. *Expert Systems with Applications* **36**, (2009), 2592-2602.
- [Patil and Patil, 2012] Ujwala Manoj Patil and J. B. Patil, Web data mining trends and techniques. In: *Proceedings of the International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics* (2012), 961-965.
- [Shaw at al., 2001] Michael J. Shaw, Chandrasekar Subramaniam, Gek Woo Tan and Michael E. Welge. Knowledge management and data mining for marketing. *Decision Support Systems* **31**, (2001), 127-137.
- [Srivastava et al., 2000] Jaideep Srivastava, Robert Cooley, Mukund Deshpande and Pang-Ning Tan. Web usage mining: discovery and applications of usage patterns from web data. In: *Proceedings of ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, (2000), 12-23.

Tietotekniikka urheiluvalmennuksessa

Joonas Suves

Tiivistelmä

Urheiluteknologia on tärkeä osa urheilua. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi helpottamaan palautteen antoa lähes lajista riippumatta. Urheiluteknologian avulla voidaan myös suunnitella taktisia kuvioita ja hallita pelisuorituksista kerättyä tilastoitavaa tietoa. Tässä tutkielmassa tutustutaan urheiluteknologiaan.

Avainsanat ja -sanonnat: Urheiluteknologia, tietotekniikka ja urheilu.

1. Johdanto

Urheiluteknologia liitetään laitteistoon tai ohjelmaan, jonka tarkoituksena on edesauttaa urheilijaa tai joukkuetta kehittymään. Urheiluteknologian avulla on mahdollista parantaa urheilijan taitotasoa, tietämystä urheilusta ja motivaatioita.

Valmentaja pyrkii parantamaan urheilijan suoritusta erilaisin keinoin. Tärkeimpiä ovat tarjota urheilijalle harjoitteluympäristö, joka kehittää tehokkaasti urheilijan oppimista ja tehokas opetus [Liebermann *et al.*, 2002]. Tietotekniikka on yksi apuneuvo urheilijan suorituksen parantamisessa.

Urheiluteknologia on informaatiotieteen ja liikuntatieteiden poikkitieteellistä yhteistyötä, jota voidaan lähteä tarkastelemaan kumman tahansa tieteenalan näkökulmasta [Link and Lames, 2009]. Mahdollisuudet tietotekniikan hyödyntämiseen kehittyvät tietotekniikan kehittymisen myötä. Luvussa 2 esitellään liikuntatieteiden ja tietojenkäsittelytieteiden yhteistyömalleja.

Motoristen taitojen kehitys alkaa syntymästä ja niiden kehittyminen on tiiviisti yhteydessä kykyyn havainnoida ympäristöä. Hermoratojen kehittyessä kyky toistaa sama liike vahvistuu. [Nurmi *et al.*, 2009.] Ihmiset ja muut kädelliset matkivat liikkeitä syntymästään lähtien ja jatkavat näin läpi elämänsä sivuuttaen tarpeen purkaa abstrakti kineettinen tai liikeopillinen informaatio [Liebermann *et al.*, 2002]. Palautteen saaminen suoritteesta on tärkeää kaiken opiskelun ja itsensä kehittämisen lähtökohtana, sillä juuri palautteen kautta ihminen pystyy kehittämään suoritustaan. Luvussa 3 käsitellään urheiluteknologian hyötyjä palautteen annossa yleisesti, ja erikseen nostetaan esille videoteknologian ja virtuaalitodellisuusympäristön hyödyt palautteen annossa.

Erilaisia urheiluteknologian sovelluksia on lukuisia ja niistä saatavat hyödyt ovat usein kohdennettu tiettyyn suorituksen osa-alueeseen. Luvussa 4 esitellään eräitä teknologioita parantamaan urheilusuorituksia yksilö- ja joukkueurheilun

näkökulmista. Urheiluteknologia on kehittyvä ala ja sen tulevaisuus on sidoksissa tietotekniikan kehitykseen. Luvussa 5 arvioidaan urheiluteknologian tulevaisuutta.

2. Liikuntatieteiden ja tietojenkäsittelytieteiden yhteistyö

Täysin poikkitieteellistä tietojenkäsittelytieteiden ja liikuntatieteiden yhteistyö ei ole, ja urheiluteknologiaa voisi kuvata termillä monitieteellinen tieteenala. Liikuntatieteiden näkökulmasta informaatiotieteet on tervetullut kumppani niillä osa-alueilla, joissa liikuntatieteilijät eivät itse kunnostaudu kuten tiedon käsitteilyssä ja ohjelmistokehityksessä, esimerkiksi dokumentoimaan harjoituksia, hallitsemaan sensoreita ja visualisoimaan datan. Toisekseen tietojenkäsittelytieteet ovat tärkeä innovaatioiden lähde harjoitteluun ja kilpailuun. Kolmanneksi liikuntatieteet odottavat, että lähestymistavat ja näkökulmat tietojenkäsittelytieteistä voidaan siirtää urheiluun. Esimerkiksi nykyaikaiset etsintämenetelmät voivat auttaa ymmärtämään erilaisia urheilun ilmiötä, kuten keinotekkoisten neuroverkkojen käyttäminen simuloimaan harjoituksen määrän suhdetta kilpailun tuloksiin, taktisten kuvioiden analysointi käsipallossa tai tunnistamaan liikesarjoja koripallossa. [Link and Lames, 2009.]

Link ja Lames [2009] ehdottavat urheiluteknologian jakamista neljään yhteistyömallikategoriaan:

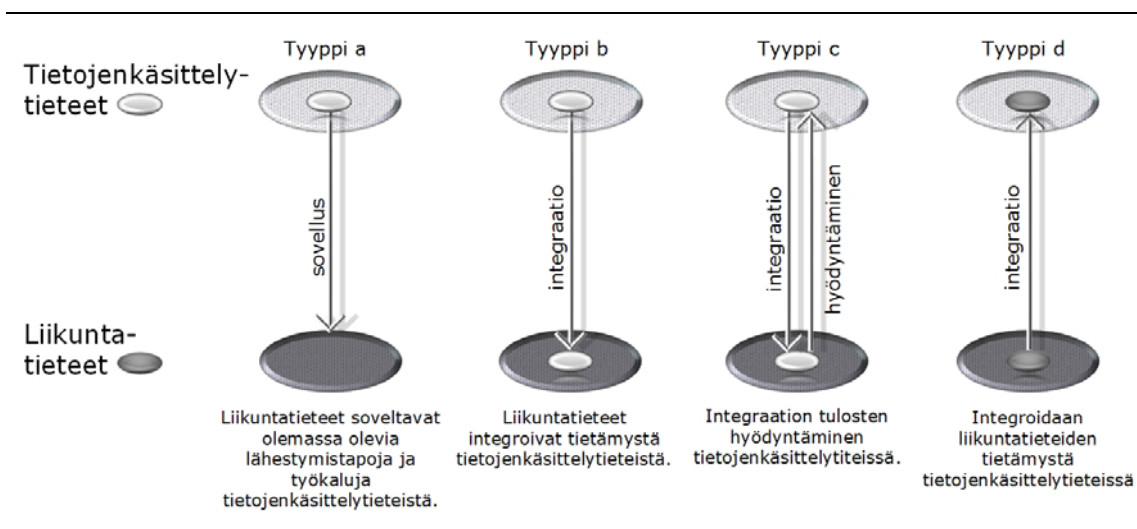
Tyyppi a: Liikuntatieteet soveltavat olemassa olevia lähestymistapoja ja työkaluja tietojenkäsittelytieteistä. Tässä tapauksessa liikuntatieteet eivät osallistu käsitteellistämiseen ja kehittämiseen, jolloin tietojenkäsittelytiede toimii anonyyminä palveluntarjoajana, ilman kosketusta liikuntatieteisiin.

Tyyppi b: Liikuntatieteet integroivat tietämystä tietojenkäsittelytieteistä. Tätä tapahtuu, kun liikuntatieteet tarvitsevat teknisiä ratkaisuja, joita ei ole olemassa kaupallisesti. Tietämystä kootaan hankkimalla se tai yhteistyössä tietojenkäsittelytieteiden kanssa, esimerkiksi opiskelijaprojektina tai kolmannen osapuolen rahoittamana projektina. Yksi näkemys tästä on, että tietojenkäsittelytieteet eivät tarjoa muuta kuin tietämyksen ohjelmistokehityksessä. Yhteistyötä ei ole tieteellisellä tasolla

Tyyppi c: Tietojenkäsittelytiede on yhteistyössä tutkimusprojekteissa, jotka kiinnostavat molempia osapuolia. Esimerkkejä ovat keinotekkoisten neuroverkkojen käyttö analysoimaan liikesarjoja tai kuvantunnistusalgorit-

mien kehittäminen urheilun analysoimiseen. Tässä tapauksessa tietojenkäsittelytiede tarkistaa käsitteitä ja metodeja, ja hyötyy saamalla uusia näkökulmia malleihin, jotka voivat olla relevantteja myös muissa soveluksissa. Liikuntatieteet hyötyvät saamalla nopeammin tietoa suorituksista ja uusia näkökulmia urheiluun.

Tyyppi d: Tyyppi d on verrattavissa tyyppiin c, erona on, että liikuntatieteiden paradigmoja ja tietämystä käytetään tietojenkäsittelytieteissä. Esimerkkinä on kinestetiikan mallien hyödyntäminen ihmismäisten robottien liikkeen ohjauksessa.



Kuva 1. Yhteistyön mallit liikuntatieteiden ja tietojenkäsittelytieteiden välillä [Link and Lames, 2009].

Tyyppin a ja b mukaisia projekteja on tehty paljon viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana, mutta vain muutamia tyyppin c ja d projekteja on toteutettu. Yksi syy tähän on, että usein ei ole aitoa poikkitieteellistä tutkimuskohdetta. Syvempi keskittyminen alueisiin, joissa tietojenkäsittelytiede voisi hyötyä liikuntatieteiden ajatusmalleista ja tietämyksestä (tyyppi c ja tyyppi d), parantaisi tilannetta. Huomion arvoista on, että liikuntatieteiden ja tietojenkäsittelytieteiden yhteistyöstä puuttuu jaettu tietämys ja rajapinta, jossa tiede vaihtuu toiseksi, joka löytyy monista tieteenaloista, missä tehdään poikkitieteellistä tutkimusta kuten esimerkiksi biologiassa ja kemiassa. [Link and Lames, 2009.]

3. Urheiluteknologian hyödyt palautteen annossa

Yleensä motoriset taidot voidaan jakaa sarjaan osia tai erillisiä taitoja, jotka muodostavat kokonaissuorituksen, ne suoritetaan samanaikaisesti tai peräkkäisessä

järjestyksessä. Palaset opeteltiin ennen peräkkäin, tutkijat kuitenkin ovat nykyään sitä mieltä, että taito integroida nämä osasuoritukset on tärkeää motoristen taitojen oppimisessa. [Iskandar *et al.*, 2011.]

Motoristen taitojen opiskelussa samanaikainen korostettu palaute voi auttaa ymmärtämään liikkeen rakenteen nopeammin ja ehkäisemään kognitiivista ylikuormittumista, mikä voi nopeuttaa noviisin oppimisprosessia. Ekspertti taas hyötyy tästä, koska tiettyjen liikesarjojen yksityiskohtien opettelu voi olla kompleksista, kun täytyy muuttaa jo automatisoitunutta, mutta väärin opittua liikesarjaa. [Sigrist *et al.*, 2013.] Oikeaoppisesti annettu palaute lisää motoristen taitojen hallintaa huomattavasti. Palaute on tärkeä osa harjaannutettaessa urheilutaidon osaamista. Informaatioteknologia on mahdollistanut korostetun palautteenannon ja parantanut palautteenantomahdollisuutta harjoituksen ja kisa suorituksen aikana. [Liebermann *et al.*, 2002.]

Gotodan ja muiden [2013] mukaan motoriset taidot voidaan jakaa ympäristön perusteella avoimiin taitoihin, jotka suoritetaan dynaamisessa ympäristössä, ja suljettuihin taitoihin, jotka suoritetaan staattisessa ympäristössä. Suljetuissa taidoissa oletetaan, että motorinen liikerata on itse taito. On tärkeää, että harjoitteen suorittaja kykenee toistuvasti uusimaan määritellyn liikeradan eli suoritekyetään toistamaan vastaavassa tilanteessa täysin samoin. Avoimen taidon he määrittelevät motorisen liikeradan tehokkuutena tuottaa tietty ympäristöön liittyvä lopputulos, joka määrittää taidon.

Palaute on relevanttia urheilijalle vain, jos tiedossa on tavoitteellinen suorite ja ymmärrys korjauksista, jotka täytyy tehdä siihen pääsemiseksi. Näiden oletusten vallitessa valmentajan tulisi tarjota korotetun palautteen ympäristö, joka johtaa optimaaliseen oppimiseen [Liebermann *et al.*, 2002].

Malleihin perustuva urheilun oppimistapa on saanut kritiikkiä, koska optimaalinen suoritus saattaa vaihdella ihmisten välillä, eikä yhden ihmisen tekemä optimaalinen suorite ei välttämättä ole optimaalinen suorite jollekin toiselle [Liebermann *et al.*, 2002].

Uskomuksen mukaan teknologiat, jotka tarjoavat välittömän palautteen hyödyntävät parhaiten oppimista. Tämä ei kuitenkaan aina ole totta, joskus on tehokasta tarjota palaute jälkeensä tarkemmin ja rajatumminkin, jotta urheilija ei saa liikaa tietoa, koska suurta tiedon määrää voi olla vaikea käsitellä ja se saattaa vaikuttaa suoritukseen. [Liebermann *et al.*, 2002.] Suorituksen aikaisen palautteen sisäistäminen on rajallista, koska urheilija keskittyy samanaikaisesti tekemiseen saadessaan palautetta [Gotoda *et al.*, 2013].

Jatkuva välitön palaute saattaa myös aiheuttaa urheilijalle riippuvuutta ulkoisesta palautteesta. Kehittyessään urheilijan tulisi kuitenkin tulla itsenäisemmäksi ja oppia luottamaan sisäisiin informaation lähteisiin eli luontaiseen palautteeseen, jonka kautta suoritusta pääasiassa tulisi korjata. Valmentajan tulee kuitenkin olla tietoinen urheilijan kehitysvaiheesta, koska eri tasoilla tarvitaan erilaista palautetta. [Liebermann *et al.*, 2002.] Luvun lopussa käsitellään vielä videoteknologia ja virtuaalitodellisuusympäristöt palautteen annossa.

Videoteknologia on huokean hintansa vuoksi saatavilla lähes kaikille urheilualalla toimiville, ja se on ehkäpä suosituin teknologia urheilussa. Videoteknologia vaatii käyttäjältään passiivista asennetta videosityksen aikana, eivätkä käyttäjät aina hallitse palautteen määrää tai ymmärrä sitä, näin etenkin kokemattomien urheilijoiden kohdalla. [Liebermann *et al.*, 2002.] Oppimisympäristö, jossa urheilija pääsee jatkuvasti palautteeseen käsiksi, saattaisi lisätä ymmärrystä, etenkin valmentajan kommentoimana, koska palautevideota voisi katsoa omaan tahtiin useamman kerran. Lajista riippuen passiivista asennetta ei myöskään tarvita tällöin, koska palautteen katsominen ei ole paikasta riippuvaista, ja mobiililaitteilla palautetta katsoessa voi harjoitteen uusia välittömästi, jos vain on mahdollisuus päästä suorituspaihalle tai suoritus ei ole paikasta riippuvaista.

Videokuvaan pohjautuvia liikkeen analysointijärjestelmiä käytetään palautteen antoon suorituksen kinestetiikasta. Tällaisilla järjestelmillä voidaan saada suoritteesta monia eri tietoja, kuten liikkeen nopeuden, keston, korkeuden ja kulman arvot, sekä analysoida suoritetta optimaaliseen suoritukseen verrattuna. [Liebermann, 2002.] Yllä on kyseenalaistettu optimaalisen suorituksen yleistäminen, joten video olisi hyvä yhdistää johonkin mitattavaan suureeseen, jolloin voidaan henkilökohtaisten tilastojen ja ympäristöolosuhteiden avulla hakea yksilölle optimaalinen suorite.

Korostetun palautteenannon muotoja ovat tieto liikeradasta suoritteen aikana ja tieto suorituksen lopputuloksesta. Näitä voidaan käyttää virtuaalitodellisuusympäristössä harjoitellessa suorituksen jälkeen, tämän tiedetään vahvistavan oppimista. [Ruffaldi *et al.*, 2011] Ajoitus on olennainen osa suoritteen tekemistä ja se on usein helpommin omaksuttavissa kuin suorittamisen kehon avaruudelliset liikkeet, vaikka suorittaja kiinnittäisi huomiota vain jälkimmäiseen [Liebermann *et al.*, 2002]. Virtuaalitodellisuusympäristössä harjoitellessa voidaan molempiin edellä mainittuihin kiinnittää huomiota.

Kolmiulotteisissa virtuaalitodellisuusympäristössä valmentaja voi säädellä ympäristömuuttujia kuten nopeus, orientaatio ja suunnanmuutokset. Nykytut-

kimukset antavat ymmärtää, että visuaalinen palaute harjoitteen aikana virtuaalitodellisuusympäristössä saattaa olla tehokkaampi kuin perinteiset valmennustekniikat. Tosin on myös tutkimuksia, joiden mukaan virtuaalitodellisuudessa tehdyt valinnat tehdään eri strategialla kuin todellisessa ympäristössä, mikä saattaa hidastaa oppimista. Potentiaalinen etu muodostuu 3D-virtuaalitodellisuuden käytössä, kun ulkoapäin tuleva palaute yhdistettynä ihmisestä itsestään lähtevään sisäiseen palautteeseen käsitellään virtuaalitodellisuusympäristössä. Tämä yhdistetty palaute havainnollistettuna edesauttaa uuden taidon oppimisessa ja parantaa olemassa olevaa taitoa. [Liebermann *et al.*, 2002.]

4. Sovelluksia ja niiden hyötyjä

Urheiluteknologian avulla voidaan kehittää urheilijan henkilökohtaisia taitoja sekä joukkueen taitotasoa. Tässä luvussa esitellään muutamia esimerkkisovelluksia, joiden on todettu kehittävän urheilijan taitotasoa sekä suunnitelma laajemmasta järjestelmästä, joka on hyödyllinen jalkapallojoukkueelle sekä pelaajalle joukkueetasolla. Esiteltäviä sovelluksia on mahdollista soveltaa muihinkin kuin esimerkeissä mainittuihin urheilulajeihin.

4.1. Urheilijan henkilökohtaisia taitoja kehittäviä sovelluksia

Tarkkuutta vaativiin lajeihin kuten, ammunta ja jousiammunta, näköaisti on ensisijainen palautekanava. Visuaalista palautetta voidaan lisätä teknologian avulla kuten käyttämällä lasertähtäintä olympia-ampumisen harjoitteluun, jolloin nähdään tarkasti, mihin tähtäys osoittaa. Kun tähän yhdistetään auditiivinen palaute, voidaan korjauksia tehdä ennen kuin laukaistaan ase. [Liebermann *et al.*, 2002.]

Urheilulajeissa, joissa ei tarvita spatiaalista tarkkuutta, mutta välitön tietämys ajoituksesta on tarpeellista, tutkateknologia on otettu avuksi tiedon keräämiseksi. Esimerkiksi pikajuoksussa reaktioajat ovat tärkeitä, ja lisäksi tarvitaan lähtönopeus ja juoksunopeus sekä horisontaaliset voimat juoksuun lähdössä. [Liebermann *et al.*, 2002] Myös hiihtovalmennuksessa tutkateknologian käyttö on todettu hyväksi, koska se mittaa nopeutta jatkuvasti. Maksiminopeuden ja keskinopeuden lisäksi saadaan tulokseen, kuinka nopeutta kyetään ylläpitämään suorituksen eri vaiheissa [Linnamo *et al.*, 2012]. Maastohiihdossa vaikuttaa ympäristön muodot nousuineen ja laskuineen, jolloin tutkalla voidaan mitata nopeuden muutoksia riippuen nousun jyrkkyydestä. Tätä tietoa voidaan käyttää vertaamaan eri hiihtotekniikan omaavien urheilijoiden eroja, jotka voidaan ha-

vainnollistaa yhdistämällä tutkan käyttö muihin teknologioihin haettaessa optimaalista hiihtotekniikkaa. On hyvä pitää mielessä optimaalisen tekniikan oleva henkilökohtainen kuten luvussa 3 on mainittu.

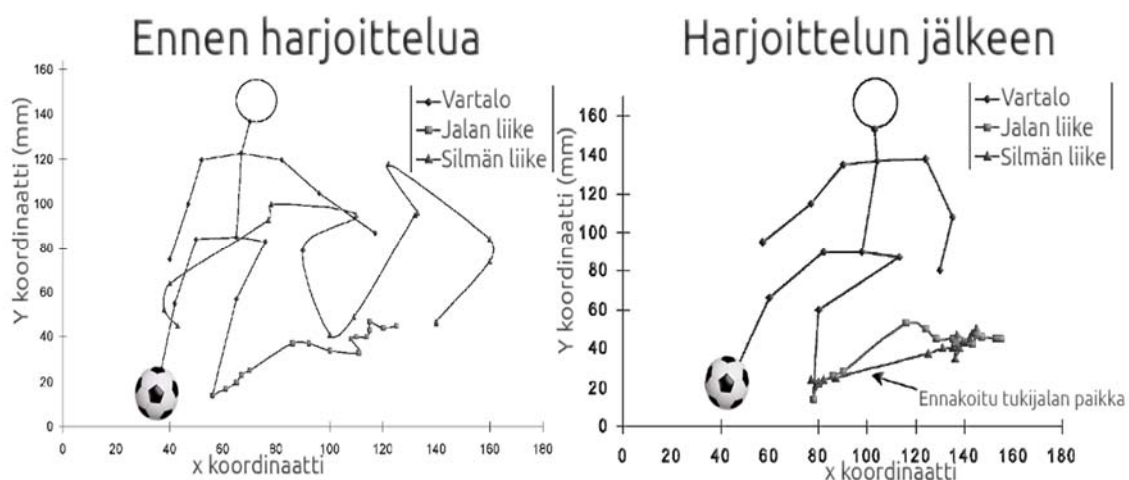
Automaattiset seurantajärjestelmät käyttävät useita eri teknologioita liikkeen seurantaan ja nauhoittamiseen, osa näistä järjestelmistä on ajantasaisia [Liebermann, 2002]. Yhdistämällä tällainen seurantajärjestelmä urheilijan omaan optimaaliseen suoritukseen saadaan nopea palaute ja urheilija voi kiinnittää välittömästi huomiota seuraavaa suoritusta varten kehitettäviin asioihin, mikä oletettavasti edesauttaa etenkin avoimien taitojen oppimisessa.

4.1.1. Katseenseurannan käyttäminen rangaistuspotkun torjumisen parantamiseen

Katseenseuranta laitteen avulla voidaan analysoida urheilijan katseen kohdistaminen ja verrata sitä ammattilaisen katseen kohdistamiseen, jolloin voidaan verrata eroja siinä, mihin urheilijoiden huomio keskittyy [Liebermann *et al.*, 2002].

Urheiluteknologian avulla saatiin parannettua jalkapallomaalivahtien oikeaa ennakointia rangaistuspotkutilanteessa merkittävästi. Liebermannin ja muiden [2002] tekemässä kokeessa maalivahtien oikea ennakointi rangaistuspotkuissa oli ennen interventiota 46 % ja sen jälkeen 75 %. Maalivahdit harjoittelivat laboratorio-olosuhteissa käyttäen katseenseurantajärjestelmää, jonka avulla valmentaja näki, mihin maalivahti suuntasi katseensa ja oikeanlaista palautetta kyettiin antamaan.

Kuvasta 2 käy ilmi, että katse on harjoittelun jälkeen oikeassa paikassa, minkä seurauksena oikea ennakointi parani huomattavasti.



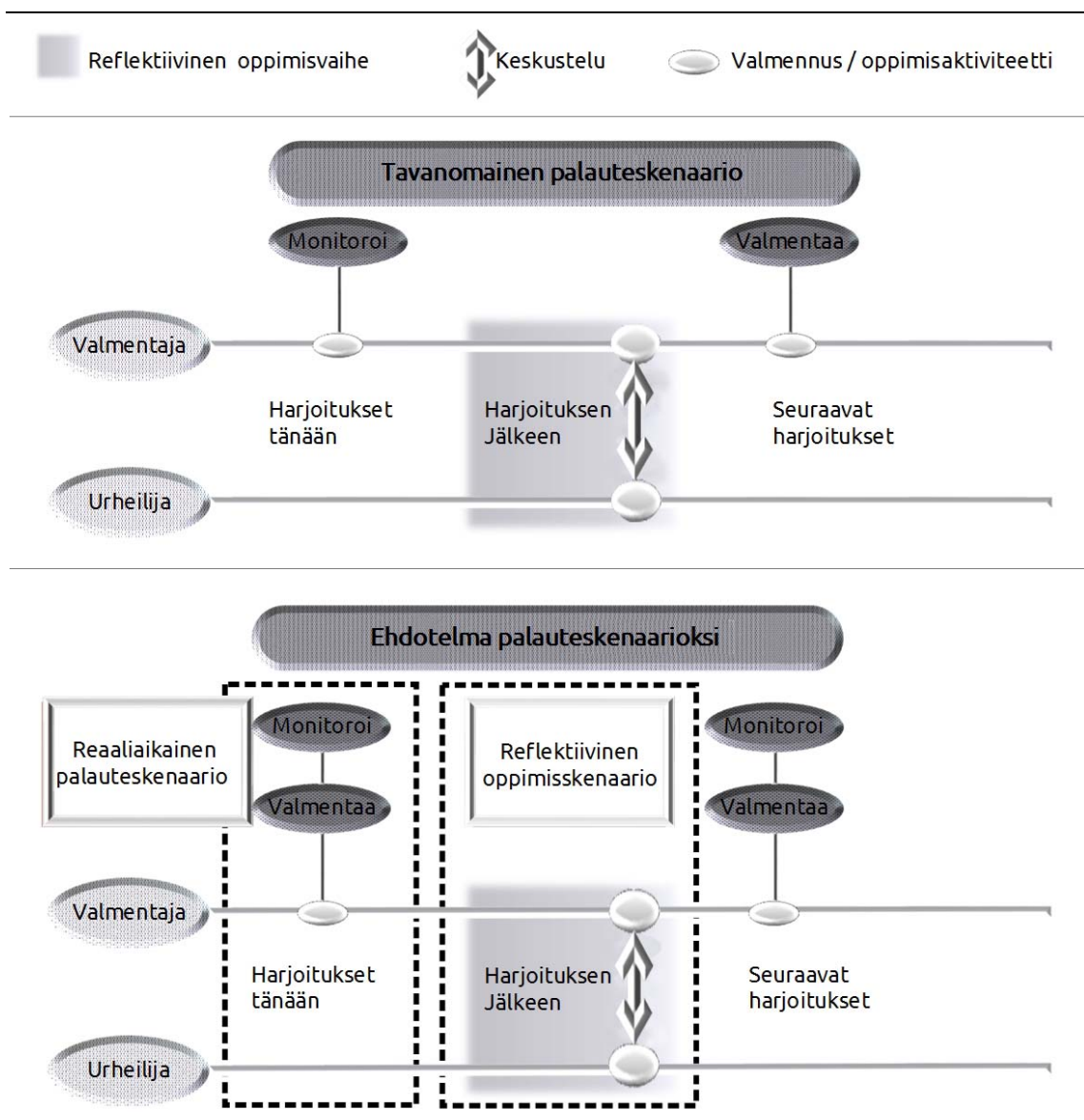
Kuva 2. Tyypillinen maalivahdin katse verrattuna tukijalan asemaan potkaisijan juoksun aikana, ennen ja jälkeen intervention [Liebermann *et al.*, 2002].

4.1.2. Palvelimella toimiva järjestelmä ajantasaiseen ja reflektiiviseen oppimiseen

Gotoda ja muut [2013] kuvailevat suunnitelman järjestelmästä, joka on tarkoitettu motoristen taitojen harjaannuttamiseen urheilussa. Järjestelmä toimii palvelimen kautta ja tuottaa automaattisesti valmennusaineiston, joka pohjautuu ajantasaiseen tietoon urheilijan suorituksesta. Esimerkkinä he käyttävät maantiepyöräilyä.

Kuvan 3 tavanomaisessa palauteskenaariossa valmennus perustuu analyysin viimeisen harjoituksen tarkkailusta. Usein harjoituksista tulevan tiedon määrä on suuri ja analysointi on aikaa vievää. [Gotoda *et al.*, 2013.] Oletettavasti tämä on yksi syy siihen, että korjauksiin liittyvä valmennus tapahtuu vasta seuraavissa harjoituksissa tavanomaisessa palauteskenaariossa. Avoimissa taidoissa harjoitteen suorittaja kohtaa joka kerta eri ympäristöolosuhteet suorittaessaan liikkeen [Gotoda *et al.*, 2013]. Luvussa 3 käsitellyn palautteenannon mukaan etenkin avoimien taitojen kannalta on reaaliaikainen palaute tärkeää.

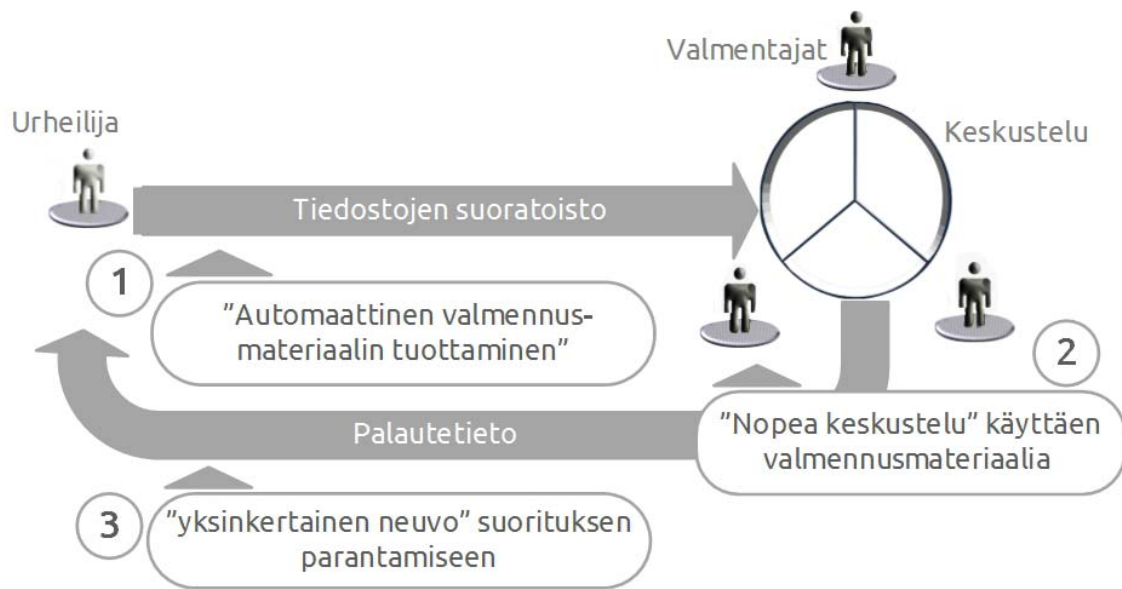
Gotodan ja muiden [2013] ehdottamassa palauteskenaariossa (kuva 3) järjestelmä mahdollistaa tarkkailun ja valmennuksen rinnakkain, koska automaattisesti generoituva harjoitteen analysoitava tieto on heti saatavilla.



Kuva 3. Tavallisen palauteskenaarion vertaus ehdotettuun palauteskenaarioon [Gotoda *et al.*, 2013].

Kuvan 3 harjoituksen aikainen reaaliaikainen palauteskenaario-osio, joka mahdollistaa ajantasaisen monitoroinnin ja valmennuksen, on tarkennettu kuvassa 4. Ensimmäisessä vaiheessa on videosta ja sensoreista koostuvan tiedon suoratoisto; järjestelmä toimittaa ajantasaisesti ja automaattisesti aineiston valmennukselle. Valmentajien mobiilisovellukseen asettamat fysiologiset kynnysarvot reagoivat mobiililaitteen langattomien sensoreiden keräämään tietoon. Tämän materiaalin avulla valmennuksen on helppo tehdä nopeita päätöksiä ja oikeita ratkaisuja ohjeistamiseen, joka tapahtuu toisessa vaiheessa kuvaa nopean keskustelun muodossa. Kolmannessa vaiheessa yksinkertainen neuvo suorituk-

sen parantamiseen kerrotaan välittömänä palautteena valmennettavalle. Valmentajat voivat palvelimen kautta välittää viestin, joka sisältää ohjeet Twitterin aikajanelle, josta urheilija voi ne lukea ilman suoraa kontaktia valmentajiin. [Gotoda *et al.*, 2013.]



Kuva 4. Reaaliaikainen palauteskenaario [Gotoda *et al.*, 2013].

Gotodan ja muiden [2013] reflektiivisellä oppimisskenaariolla urheilija saa laadullisesti sekä määrällisesti paremman palautteen ja voi reflektoida suoritustaan. Reflektiivinen oppimisskenaario tapahtuu harjoituksen jälkeen internetissä olevan sisällönhallintajärjestelmän harjoituspöytäkirjan kautta, jolla voidaan toistaa nauhoitettu video synkronisesti sensoreilla kerätyn palautetiedon kanssa, mikä johtaa hyvään reflektioon harjoitteen eri kohdista. Harjoitteen läpikäynti jälkeinpäin on tärkeä osa kehittymistä urheilijana, koska tiedon omaksuminen ei aina tapahdu hetkessä, kuten on perusteltu luvussa 3.

4.2. Joukkueen yhteispeliä kehittäviä sovelluksia

Osa tutkijoista on omistautunut liikekuvioiden, strategian ja taktiikan tutkimiseen joukkueurheilussa. Analysointijärjestelmät, joista monet nykyään ovat tietokonepohjaisia, ovat suunniteltu kuvaamaan yksityiskohtaisesti urheilijan liikkeitä ja teknisiä suorituksia. Ensimmäiset tietokonepohjaiset urheiluanalysointijärjestelmät tulivat mahdollisiksi, kun tietokoneella kyettiin kontrolloimaan videokuvaa ja näin parantamaan urheilun lajikohtaisia analyttisiä prosesseja. Tieto jota tällaisista järjestelmistä saadaan, voidaan käyttää moneen tarkoitukseen [Liebermann *et al.*, 2002.]:

I välitön palaute

II tietokannan luominen

III indikoimaan alueet, joissa on kehittämisen varaa

IV arviointiin

V mekanismina selektiiviseen etsimiseen pelin videotaltiosta.

Kaikki nämä funktiot ovat tärkeitä valmennukselle ja olemassaolon syy urheiluanalysoinnille [Liebermann *et al.*, 2002].

Nykyään on olemassa monia erilaisia tapoja tiedon keruuseen ja analysointiin, mutta periaate niissä usein on edellä mainitun kaltainen ja syy niiden käyttöön on tehostaa joukkueen suoritusta. Tiedonvälityksen nopeus ja oikea-aikaisuus sekä tiedon laatu ovat merkittävä tekijä joukkueurheilussa. Näin on ainakin jalkapallossa, jossa pelistä tulee valtava määrä tietoa analysoitavaksi ja tämä tieto on saatava prosessoitua siten, että vain tärkein tieto esitetään valmentajalle mahdollisimman ajantasaisesti [Rodrigues *et al.*, 2014].

4.3. Footdata

Portugalissa kehitetään Algarven yliopiston ja jalkapallovalmentaja Domingos Paciêncian toimesta verkkosovellusta (Footdata), joka sisältää sosiaalisen median (FootData-Social) tyypilliset toiminnallisuudet sovitettuna jalkapalloympäristöön ja ammattimaisen komponentin (FootData-PRO), jota voidaan pitää jalkapallon toiminnanohjausjärjestelmänä. FootData-PRO hankkii ja prosessoi tiedon kaikkiin jalkapallojoukkueen valmennuksen tarpeisiin. [Rodrigues *et al.*, 2014] Tuomalla Internet-yhteydellä varustetun toiminnanohjausjärjestelmän urheiluun antaa se mahdollisuudet joukkueelle yhtenäiseen toimintaan sekä taktiikan hiomiseen ilman aika- ja paikkasidonaisuutta, ja järjestelmän tuoma apu on helposti kaikkien joukkueen jäsenten saatavilla. Footdataan suunniteltu toiminnallisuus sisältää videoteknologian käyttöä valmennuksen apuna ja laskennallisia videoanalyysijä jalkapallopelistä sekä pelaajien liikehdintää ja joukkueen taktiikkaa analysoivan ohjelmiston [Rodrigues *et al.*, 2014].

Footdata-PRO sisältää tiedonhankintajärjestelmän, joka kerää tietoa reaali-maailmasta ja muuttaa ne numeerisiksi arvoiksi, joita voidaan ohjelman avulla manipuloida sekä tietojärjestelmän, joka on jakautunut viiteen päämoduuliin [Rodrigues *et al.*, 2014]:

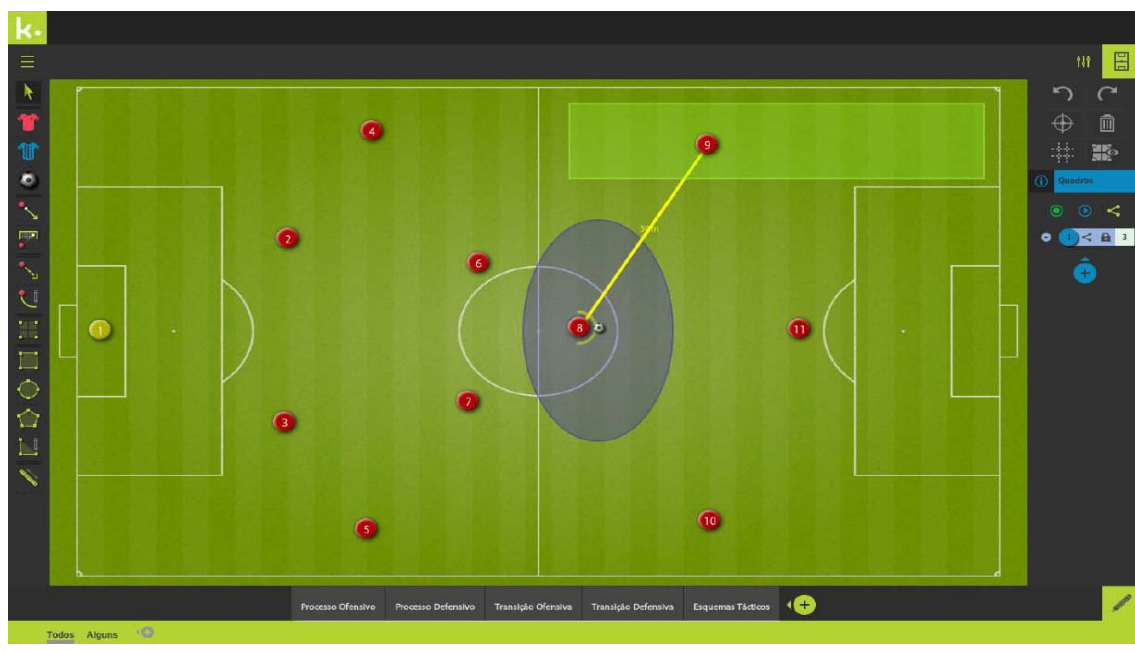
- (a) Kenttämoduuli, jossa pallon ja pelaajien sijainti nurmella havaitaan tietokonenäön avulla. Tämä informaatio lähetetään palvelimelle, jossa taktiset suunnitelmat vahvistetaan. Tämä perustuu tietoon valmistelluista

taktisista kuvioista, harjoituksista, pelaajista ja kollektiivisesta informaatiosta molemmilta joukkueilta. Yllä mainitun prosessin valikoitu tieto lähetetään valmentajan mobiililaitteeseen valmentajan profiilin asetuksien ja kenttätapahtumien ohjaamana.

- (b) Keskusmoduuli, jossa kaikki tieto ja päälaskentaproseduurit ovat kootuna.
- (c) Valmentajamoduuli, jossa syötetään tietoa ja päästään käsiksi kaikkeen yksityiskohtaiseen informaatioon kuten, kykyjenetsintään ja lääkintähuoltoon.
- (d) Pelaajamoduuli tarkoituksena on lähettää kohdennettua tietoa pelaajalle.
- (e) Esitysmoduuli, jossa puoliautomaattiset esitykset valmistellaan pelaajille esikäsiteltyinä hetkinä.

Integroitu verkkosovellus yhdistää yllä listatut kohdat yhteen paikkaan, jossa on käytössä videomanipulaatiotyökaluna, taktista suunnittelua varten piirto-ohjelmia ja puoliautomaattisia esitystyökaluja [Rodrigues *et al.*, 2014]. **Error! Reference source not found.**

Kuvan 5 verkkoyhteydessä olevan kenttäeditorialustan avulla valmentaja voi näyttää pelaajille tarkoituksenmukaisen harjoitus- ja pelikuvion animaation avulla kohdentaen sen tiettyyn pelitilanteeseen tai kuvioon liittyväksi ja verrata näytettyä kuviota kentällä tapahtuneeseen todelliseen suoritteeseen [Rodrigues *et al.*, 2014].



Kuva 5. Esimerkki kuvion piirtämisestä kenttäeditorikäyttöliittymässä [Rodrigues *et al.*, 2014].

Paperille tehtävät tilastoinnit pelin kulusta on yleinen tapa, jolla tilastot pelitapahtumista luodaan. Perinteinen tilastointimenetelmä vaatii useita täsmällisiä ihmisiä tekemään tilastointi- ja analysointityön. Raportointi valmentajille ja pelaajille pelitapahtumista tapahtuu vasta pelin jälkeen. Footdata-järjestelmässä käyttäjä voi piirtää ennakoitua tapahtumaa kentällä web-sovellukseen, jonka jälkeen nämä liikkeet havaitaan automaattisesti pelin aikana käyttäen seurantatietoa Full HD -videoista tai lähitulevaisuudessa ajantasaisista pelin aikana hankittavista kuvista. Tämän seurauksena tieto pelitapahtumista voidaan antaa ajantasaisesti, joka mahdollistaa välittömän analyysin pelaajien ja joukkueen toimista. [Rodrigues *et al.*, 2014.] Footdata-järjestelmällä on mahdollisuus korvata paperi ja kynä jalkapallon pelitapahtumien tilastointimenetelmänä. Lisäksi Footdatan ja sen kaltaisten järjestelmien myötä mahdollistuu useammille seuroille, junioreille ja alemmillekin sarjatasoille ammattimainen pelianalyysi pelitapahtumista, koska ei tarvita useita ihmisiä tekemään tilastointia ja analysointia.

Footdatan suunnittelua tehdään käyttäjälähtöisesti, vaikka projektissa ei käytetä käyttäjäkeskeistä suunnittelua. Projektissa käytettävä suunnittelumalli on suunnitteluajattelu (design thinking). Käyttäjälähtöiseen ajatteluun viittaa projektissa mukana oleva valmentaja, joka valvoo sovelluksen rakennetta – idea käyttäjälähtöisestä suunnittelusta ei ole uusi ja silti se on erittäin hyvä, koska on tärkeää pitää mielessä, kenelle suunnitellaan ja tehdään.

Footdata-projekti voidaan luokitella luvussa **Error! Reference source not found.** mainittuun tyyppiin c, koska jalkapallovalmentajan mukanaolo tuo yhteistyön ja kehitettävää teknologiaa voidaan mahdollisesti hyödyntää tulevaisuudessa muuhunkin tarkoitukseen kuin jalkapalloon.

5. Urheiluteknologian tulevaisuus

Tulevaisuuden ennustaminen ei ole helppoa. Link ja Lames [2009] perustivat oman ennusteensa Saksan opetus ja tutkimus ministeriön tutkimukseen vuodelta 2006, josta he kokosivat tulevaisuuden ennusteet, jotka mahdollisesti vaikuttavat urheiluteknologian kehitykseen. Seuraavat ennusteet P1 – P10 yrittävät antaa optimistisen katsauksen, kuinka tietotekniikkaa käytetään urheiluvalmennuksessa vuonna 2020:

P1 Paikannusjärjestelmiä ja kevyitä sensoreita voidaan käyttää siirtämään tietokoneelle kokonaisvaltainen fysiologinen ja sijainnillinen data. Tämä

tieto toimitetaan valmentajille, urheilijoille ja tiedotusvälineille reaaliaikaisesti.

- P2 Pelien taktisia kuvioita voidaan analysoida automaattisesti parantuneiden tekoälysovellusten avulla.
- P3 Virtuaalitodellisuuden ympäristöt simuloivat monia urheilulajeja lähes todellisuutta vastaten, tämä mahdollistaa havaitsemisen, kognition ja päätösten harjoittelun urheiluun liittyvissä tilanteissa.
- P4 Uusia näyttötekniologioita integroidaan urheiluvaatteisiin (esimerkiksi aurinkolaseihin) tarjoten urheilijoille tietoa harjoittelun ja kilpailusuoritusten aikana.
- P5 Urheilussa käytetään älyvaatteita kuten sensori- ja käyttölaiteominaisuuksia diagnosoimaan, ennaltaehkäisemään sekä parantamaan suorituksia.
- P6 Biomekaaniset mallit voivat simuloida ihmisen liikettä täydellisesti ilman, että käytetään liikkeen pysäytystä tai alku- ja loppukehyksiä. Tämä mahdollistaa virtuaalisten hahmojen animaation, jotka näyttävät ja liikkuvat aivan kuten ihmiset. Näiden mallien avulla voidaan myös tehdä humanoidirobottien liikkeistä inhimillisempiä.
- P7 Simulaatioista on tullut tärkeä tutkimustyökalu luonnontieteissä. Harjoituksen simulaatio voi korvata todellisen tilanteen harjoittelun useissa tapauksissa.
- P8 Laskennallisen tehon ja pilvipalveluiden lisääntyessä mahdollistuu urheiluvälineiden ja urheilijoiden värähtelyn, virtauksen ja liukumisen simulointi realistisemmin kuin nykyään.
- P9 Urheiluseurojen rooli harjoitusten paikallisen organisoijan asemassa vähenee. Joukkueitten luonti somen kautta tulee tärkeämmäksi tavalliselle harrastajalle.
- P10 Luokassa pidettävät luennot yliopistoissa menettävät merkityksensä. Melkein 50 % kaikista teoriakursseista ja seminaareista liikuntatieteissä korvataan vastaavilla verkkokursseilla.

Edellä mainittu arvio on tehty vuoden 2006 tietotekniikan kehittymisen arvioon perustuen, ja kaikki edellä mainitut kohdat P1 – P10 on mahdollista toteuttaa jo nyt vuonna 2014.

Todennäköisesti urheiluteknologia tulee halpenemaan, kuten muukin tietotekniikka halpenee, kehittymisen myötä. Ehkäpä urheilu teknologiaan tulee

muun opetusohjelmien trendien mukaisesti maksullisten sovellusten tilalle avoimen lähdekoodin sovelluksia, ja sensoriteknologian halventuessa mahdollistuu urheiluteknologian hyödyntäminen myös pienille seuroille, junioreille ja aktiiviharrastajille.

6. Yhteenveto

Kiistatonta on, että urheiluteknologiasta on hyötyä palautteen annossa, joka on yksi valmennuksen tärkeistä tehtävistä. Välittömän palautteen lisäksi tärkeä jälkeenpäin saatu palaute jäi pienemmälle huomiolle läpikäymissäni artikkeleissa. On hyvä, että urheiluun kehitetään oppimisympäristöjä, jossa urheilija voisi tarkastella omia suorituksiaan valmentajan kommentteilla ajan kanssa ja reflektoida oppimaansa, mikä on tärkeä osa oppimista.

Liikunnan avuksi on suunniteltu ja tehty paljon sovelluksia ja aluetta on tutkittu kohtuullisesti. Kuitenkin usein urheiluteknologia kulkee muun tietotekniikan kehityksen perässä käyttäen sovelluksia, jotka on koottu osista, jotka on suunniteltu alun perin muihin käyttötarkoituksiin kuin urheiluvalmennukseen. Tämä saattaa aiheuttaa kompromisseja ja tyytymistä tiettyyn tasoon, vaikka tavoite määrittelyvaiheessa on ollut korkeammalla.

Havaitsemani perusteella urheiluteknologiasta puuttuu sama avoimen lähdekoodin ja ilmaisen tiedonjakamisen mentaliteetti, joka tietojenkäsittelytieteissä ja muussa yleisessä opetuksessa on vallallaan. Footdatan kaltaisia kokonaisvaltaisia toiminnanohjausjärjestelmiä kaivataan urheiluun, onhan niitä muussa opetuksessa ollut jo pitkään.

Viiteluettelo

- [Gotoda et al., 2013] Naka Gotoda, Yoshihisa Sakurai, Kenji Matsuura, Koji Nakagawa and Chikara Miyaji, A server-based system supporting motor learning through real-time and reflective learning activities. In: *Human-Computer Interaction. Applications and Services*. Springer, 2013, 84-93.
- [Iskandar et al., 2011] Yulita Hanum P. Iskandar, Lester Gilbert and Gary B. Wills, Pedagogy in computer-based sport training. In: *Proc. of 11th IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), 2011* (2011), 403-408.
- [Liebermann et al., 2002] Dario G. Liebermann, Larry Katz, Mike D. Hughes, Roger M. Bartlett, Jim McClements and Ian M. Franks, Advances in the application of information technology to sport performance. *Journal of Sports Sciences* **20**, 10 (2002), 755-769.

- [Link and Lames, 2009] Daniel Link and Martin Lames, Sport Informatics–Historical roots, interdisciplinarity and future developments. *International Journal of Computer Science in Sport* **8**, 2 (2009), 68-87.
- [Linnamo et al., 2012] Vesa Linnamo, Olli Ohtonen, W. Rapp, T. Lemmettylä, C. Göpfert, P. Komi, M. Ishikawa, HC Holmberg, P. Vähäsöyrinki and J. Mikkola, Sports technology, science and coaching. In: *Proc. of the Secondnd International Congress on Science and Nordic Skiing–ICSNS* (2012), 28-31.
- [Nurmi et al., 2009] Jari-Erik Nurmi, Timo Ahonen, Heikki Lyytinen, Paula Lyytinen, Lea Pulkkinen and Isto Ruoppila, Motoriikan varhaiskehitys. Teoksessa *Ihmisen psykologinen kehitys*. WSOY, 2009, 26-28.
- [Rodrigues et al., 2014] João Rodrigues, Pedro JS Cardoso, Tiago Vilas, Bruno Silva, Pedro Rodrigues, Antonio Belguinha and Carlos Gomes, A computer vision based web application for tracking soccer players. In: *Universal Access in Human-Computer Interaction. Design and Development Methods for Universal Access*. Springer, 2014, 450-462.
- [Ruffaldi et al., 2011] Emanuele Ruffaldi, Alessandro Filippeschi, Carlo Alberto Avizzano, Benoît Bardy, Daniel Gopher and Massimo Bergamasco, Feedback, affordances, and accelerators for training sports in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* **20**, 1 (2011), 33-46.
- [Sigrist et al., 2013] Roland Sigrist, Georg Rauter, Robert Riener and Peter Wolf, Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review. *Psychonomic Bulletin & Review* **20**, 1 (2013), 21-53.

Katseenseuranta markkinoinnin tutkimusmenetelmänä

Heikki Tammisalo

Tiivistelmä.

Markkinoinnissa asiakkaan käytökseen ja päätöksentekoon liittyvä tietämys on kullanarvoista, ja katseenseuranta on merkittävä tapa päästä tähän tietoon käsiiksi. Katseenseuranta kehittyy alati niin käytettävissä olevien instrumenttien kuin datan analysoinnissa ja yhdistelemissä käytettävien metodien osalta. Viimeaikaisiin trendeihin lukeutuu mm. neurologisen datan yhdistäminen katsedataan, mikä on mahdollistanut uudenlaista perehtymistä markkinoinnin vastaanottajan näkökulmaan.

Tämä tutkielma tarkastelee katseenseurannan käyttömahdollisuuksia sekä vahvuuksia ja heikkouksia visuaaliseen markkinointiin liittyvässä tutkimuksessa. Katseenseurannan sovellutukset voidaan jakaa karkeasti kahteen kategori-
aan: digitaalinen- eli käytännössä verkkomarkkinointi sekä nk. reaali-
maailman markkinointi. Digitaalisella puolella keskityn mainosten sivuuttamista koske-
vaan ”banner blindness”-ilmiöön sekä web-mainosten tehokkuuden arvioimis-
ta edesauttaviin menetelmiin.

Esittelen myös joitakin menetelmiä, joilla voidaan selvittää fyysisten tuot-
teiden ominaisuuksien vaikutuksia markkinointiviestien välittymiselle. Kerron
kannettavien katseenseurantalaitteistojen mahdollistamista, aidoissa tai aidon-
kaltaisissa ympäristöissä toteutettavista tutkimuksista, jotka valottavat kulutta-
jien käytöstä reaali-
maailman valintatilanteissa. Lisäksi käsittelen lyhyesti muu-
tamia erikoisempia katseenseurantatutkimuksen kohteita.

Avainsanat ja -sanonnat: Katseenseuranta, markkinointi, digitaalinen markki-
nointi, neuromarkkinointi, verkkomainonta

1. Johdanto

Wedel ja Pieters (2008a) määrittelevät visuaalisen markkinoinnin seuraavasti:
kaupallisten ja ei-kaupallisten visuaalisten merkkien ja symbolien hyödyntä-
minen haluttujen ja/tai hyödyllisten viestien ja kokemusten välittämiseksi ku-
luttajille.

Visuaalinen markkinointi on dominoivassa asemassa siitä yksinkertaisesta
syystä, että ihmiset aistivat pääasiallisesti silmillään. Samasta syystä visuaalisen
huomion kiinnittäminen on kovasti kilpailtu alue, ja siksi myös markkinoinnin
tutkimus painottuu eniten visuaaliseen puoleen (Wedel & Pieters, 2008b).

Markkinointi vaatii investointeja, ja mainoskampanjoiden tuloksia seurataan nykyisin tarkasti, jotta voitaisiin toisaalta todeta markkinointiviestien ylipäänsä tehoavan ja jotta mainoskampanjoiden teho voitaisiin maksimoida käytettyihin resursseihin nähden. Katseenseuranta onkin kuulunut printtimainostamisen tutkimuksen työkaluihin jo vuosikymmeniä (Karslake, 1940), ja nykyisten, hieman kehittyneempien välineiden ja metodien avulla katseenseuranta voitaneen nykyisin soveltaa lähes kaikilla visuaalisen markkinoinnin tutkimuskentillä jollakin tavoin.

Nykymetodit perustuvat useimmiten silmien kohdistumisista eli fiksaatioista sekä näiden välisistä siirtymistä eli sakkadeista muodostuvien katsepolkujen (*scan paths*, kuva 3) tallentamiseen. Koska katseen fiksaatiot ovat vahva indikaattori visuaalisen huomion kohdistumiselle (Hoffman, 1998), katsepolkujen analysoiminen mahdollistaa välillisesti visuaalisen huomion analysoimisen, esimerkiksi tilastoimalla fiksaatioiden määrä tietyille kohdealueille tai erilaisilla katseen käyttäytymistä kuvaavilla visualisoinneilla.

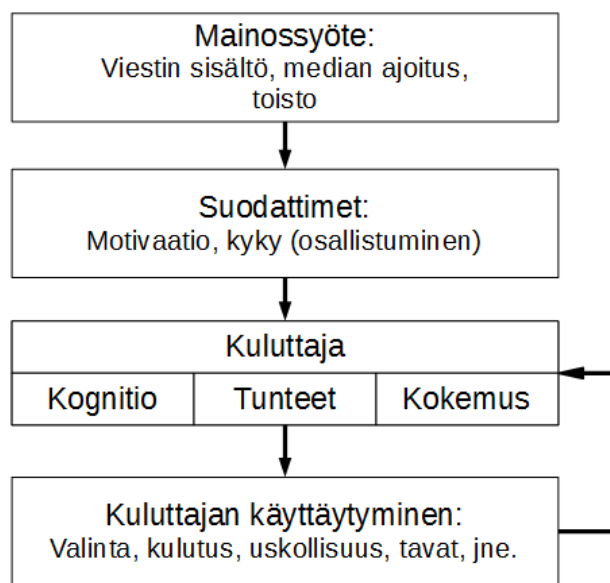
Historiallisesti katseenseurantatutkimus on ollut käytettävien välineiden kömpelyyden vuoksi enemmän tai vähemmän rajoittunutta paikallaan oleviin kohteisiin, kuten printtimainoksiin, lehtiin tai web-sivustoihin. Teknologian kehittymisen myötä kannettavaan kokoon pienentyneet katseenseurantalaitteistot ovat mahdollistaneet käyttäjäkokeiden toteuttamisen ”kenttäolosuhteissa”, esimerkiksi aidossa tai aidon kaltaisessa supermarketympäristössä.

Samaan aikaan web-markkinointi on alana jatkanut kasvuaan lähes pysähtymättä viimeisten kymmenen vuoden aikana (IAB & PwC, 2014), ja kenties siksi myös suurin osa visuaalisen markkinoinnin tutkimuksesta sijoittuu verkon puolelle (Wedel & Pieters, 2008b).

Oli kyse sitten fyysisessä tai digitaalisessa ympäristössä tapahtuvasta markkinoinnista, niin uusimpia suuntauksia edustaa nk. 'neuromarkkinointi', joka visuaalisen markkinoinnin yhteydessä tarkoittaa sitä, että katseenseurantadata yhdistetään reaaliaikaiseen neurologiseen dataan. Tällöin koehenkilön aivotointaa kuvaavia signaaleja voidaan tarkkailla ja tallentaa visuaalisen kokemuksen aikana, useimmiten joko EEG-, MEG- tai (f)MRI-laitteistolla (Morin, 2011). Vaikuttaisi siltä, että neuromarkkinointi tulee tutkimusalana vaikuttamaan merkittävästi koko laajemman markkinointialan kehittymiseen ja prioriteetteihin.

2. Katseenseuranta ja markkinointi

Mainostaminen lienee markkinoinnista se osa-alue, joka on kuluttajalle kaikista näkyvin, ja siksi viestien välittymisen kannalta kenties tärkein. Vakratsas ja Ambler (1999) tekivät kirjallisuusanalyysin yhteensä 250 tutkimusartikkelista ja kirjasta tavoitteenaan luoda uudenlaiset puitteet mainostamisen tutkimiselle. He päätyivät kuvan 1 malliin, jossa mainostamista tutkitaan kuluttajan kannalta kolmella ulottuvuudella: kognitio, tunnetila ja kokemus.



Kuva 1: Mainostamisen toimintaperiaate. Muokattu lähteestä Vakratsas & Ambler (1999)

Suurin osa tämänhetkisestä markkinointiin liittyvästä katseenseurantatutkimuksesta liittyykin jollakin tavalla juuri kuluttajan aikeisiin, tuntemuksiin tai tuotteen arviointiprosessiin (jota voitaneen pitää myös eräänlaisena kokemuksesta tuotteesta) (Lufimpu-Luviya et al., 2014).

Hyvin usein, kun tutkittavan ilmiön kohteena on ihmisen kokemus, koehenkilöiden halutaan myös raportoivan ajatteluaan tai tuntemuksiaan. Useimmiten tällaista tietoa kerätään haastattelun avulla tai pyytämällä koehenkilöitä verbalisoimaan ajatuksiaan kokeen aikana "ajattelemalla ääneen". Ajatusten pukeminen sanoiksi valitettavasti lisää koehenkilön kognitiivista kuormaa ja saattaa vaikuttaa koetehtävän suorittamiseen tai katseen kohdistumiseen merkittävästi.

Katseenseurannan etuna voidaankin pitää myös sitä, että koetilanteessa koehenkilön ei tarvitse ajatella ääneen samalla, kun hän suorittaa annettua tes-

titehtävää. Sen sijaan tallennettu katsedata voidaan jälkikäteen näyttää koehenkilölle, ja pyytää häntä selostamaan ajatuksen kulkua jälkikäteen. Tällöin äänen ajattelu ei pääse vaikuttamaan katsedataan eikä itse tehtävän suorittamiseen. (Guo, 2009)

Viime vuosina katseenseurannasta on tullut yhä varteenotettavampi työkalu yrityksille, jotka haluavat seurata markkinointiviestiensä välittymistä kuluttajille. Teknologian, ja sitä myötä käytettävissä olevien välineiden ja metodien kehittyminen, on tehnyt käytännön kokeista nopeampia, halvempia, vaivattomampia sekä vähemmän invasiivisia koehenkilöille. Nykyaikaiset laitteistot eivät myöskään vaadi erityisolosuhteita, jolloin kokeet on mahdollista toteuttaa aidoissa konteksteissa, vastakohtana tarkoin kontrolloiduille laboratoriomaisille olosuhteille. (Wedel & Pieters, 2008a)

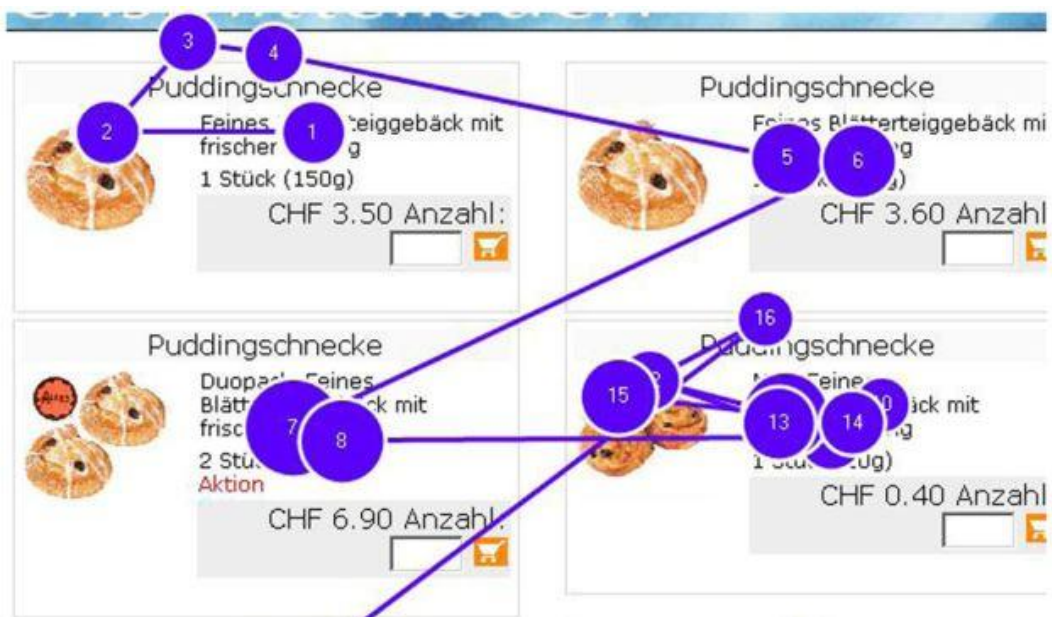
Jo pelkällä katseenseurantadatalla voidaan päästä osin ja välillisesti analysoimaan kuluttajan kognitiota, sikäli kuin sillä on yhteys katseen kulkuun. Pelkästään katseen kohdistuminen tai liikkuminen ei kuitenkaan välttämättä ole osoitus edes näköhavainnon tietoisesta prosessoinnista (Hayhoe, 2004) □. Toisaalta jo Yarbus (1967) osoitti, että katseen kulku on vahvasti riippuvainen siitä, minkälaista kognitiivista tehtävää katselija suorittaa. Hiljattain saman ilmiön ovat vahvistaneet mm. Rothkopf ja muut (2007). Pelkän katsedatan varassa on siis helppo tehdä virhetulkintoja, etenkin jos käytetyt metodit eivät sovellu parhaalla mahdollisella tavalla tutkimusongelman selvittämiseen.

Katsedataan perustuvassa tutkimuksessa metodologia onkin erityisen tärkeää suunnitella oikein, mieluiten aitoja skenaarioita ja tehtäviä käyttäen. Tällöin katseen kulku vastaisi parhaalla mahdollisella tavalla oikeaa tilannetta, jolloin myös tulokset ovat mahdollisimman valideja (Nielsen, 2007). Käypiä ohjeistuksia katseenseurantatutkimuksien oikeaoppiseen toteuttamiseen on olemassa (Pernice & Nielsen, 2009; Duchowski, 2007; Holmqvist et al., 2011).

Kun katsedataa on tavalla tai toisella saatu kerättyä, se voidaan analysoida esimerkiksi tilastoimalla fiksaatioiden määrä ennalta määritellyille alueille tai työstämällä datasta erilaisia visualisaatioita. Ne auttavat hahmottamaan eri asioita, esimerkiksi *heatmap*-tyylinen visualisaatio (kuva 2) kertoo lähinnä, mitä alueita katsottiin ja minkä verran. Jos tavoitteena olisikin selvittää, missä järjestyksessä vaikkapa mainoksen teksti ja kuvat tyypillisesti luetaan, olisi parempi visualisoida fiksaatiot ja sakkadit raаемmassa muodossa, kuten usein käytettyinä viivoina ja palloina (kuva 3).



Kuva 2: Katsedatasta koostettu 'heatmap'-visualisaatio (Piqueras-Fiszman et al., 2013).



Kuva 3: Visualisaatio fiksaatioiden ja sakkadien muodostamasta katsepolusta.
(Schmutz et al., 2010)

Pelkkä katsedata kuitenkin kertoo suoranaisesti ainoastaan sen, mihin henkilön visuaalinen mielenkiinto kohdistuu ja missä järjestyksessä. Esimerkiksi katseen fiksaatio Coca-Cola-pulloon ei kerro, kiinnittyikö henkilön huomio esiineseen sen kirkkaan värisen etiketin tai poikkeavan muodon vuoksi, vai kenties brändin tunnistamisen myötä.

Koska tavoitteena on usein päästä selville kuluttajien kognitiosta, tunteista tai kokemuksesta, katseenseurantatutkimuksiin osallistuvilta koehenkilöiltä yleensä kerätään tietoa heidän ajatuksistaan joko kokeen aikana tai pian sen jälkeen, joko haastattelemalla koehenkilöä tai pyytämällä häntä "ajattelemaan ää-

neen” tai muuten selostamaan toimintaansa. Katseenseurantadatan tallentaminen ja toistaminen mahdollistaa myös koetilanteen jälkeen tapahtuvan, retrospektiivisen ääneenajattelun. Tällöin koehenkilö voi varsinaisen koetehtävän jälkeen selostaa, mitä hän ajatteli tai tunsu kunkin katsetapahtuman kohdalla. Tällöin ääneenajattelun kognitiivinen kuorma ei pääse vaikuttamaan itse koetehtävän suorittamiseen ja sitä kautta kokeen tuloksiin.

Tällaiseen, koehenkilöiden itse raportoimaan dataan liittyy kuitenkin ongelmallisuutta. Ensinnäkin monimutkaisten ajatusprosessien ja tunnetilojen tarkka ilmaiseminen sanoin ei välttämättä ole edes mahdollista, koska käytöstämme ohjaavat sellaiset alitajuiset prosessit, joihin tietoinen osa mielestä ei juuri pääse käsiksi (Calvert & Brammer, 2012). Lisäksi ihmisillä voi esiintyä eräänlaisia kognitiivisia vinoumia, suodattimia tai itesesensuuria, kun heitä pyydetään puhumaan vieraille henkilöille hyvin henkilökohtaisiksiin koetuista asioista. Koehenkilöt saattavat kertoa tutkijoille sen, mitä olettavat näiden haluavan kuulla, tai he saattavat vaikkapa unohtaa kertoa tutkimuksen kannalta tärkeitä seikkoja.

Puolueettoman, kognitiota ja tunnetiloja kuvaavan datan hankkimiseksi on saatavilla yhä enenevässä määrin teknologisia keinoja. Eräs mahdollisuus on yhdistää koehenkilön katsedataan reaaliaikaista neurologista (esim. EEG-, MEG- tai (f)MRI-) dataa. Kaikkein tarkinta tietoa lienee mahdollista hankkia tarkkailemalla koehenkilön aivojen eri alueiden aktivoitumista toiminnallisella magneettiresonanssikuvauksella. Tämä mahdollistaisi esimerkiksi aivojen eri tunnealueiden tai päätöksentekoon liittyvien alueiden aktivoitumisen mittaamisen suhteessa silmien kohdistamiin visuaalisiin ärsykkeisiin.

Neurologista dataa hyväksi käyttävä neuromarkkinointi onkin viime aikoina noussut yhä merkittävämmäksi välineeksi, joka osaltaan mahdollistaa markkinointiviestien räätälöimisen yhä tarkemmin juuri tietynlaisten kokemusten välittämiseksi (Zurawicki, 2010).

Neurologinen data voi auttaa ymmärtämään kuluttajan arviointi- ja valintaprosessin eri osia, kuten esimerkiksi sitä, mitä ominaisuuksia asiakkaat pitävät tärkeimpinä arvioidessaan ja vertaillen erilaisia tuotteita (Khushaba et al., 2013).

Raaka fysiologinen ja neurologinen data vaatii kuitenkin lopulta aina jonkin asteista tulkintaa, ja tässä suhteessa koehenkilöiden oma raportointi on varmasti edelleen hyödyksi.

Tässä tutkielmassa käsittelemäni markkinointisovellukset ja tutkimusalueet on jaettu karkeasti kahteen sen mukaan, onko kyse digitaalisesta (kuten web-mainonta) vai fyysisestä (kuten hyllynäkyvyys tai printtimainonta) markkinoinnista. Menetelmät, etenkin erikoisemmat, vaihtelevat paljon näiden aihealueiden välillä, joskin myös samankaltaisuuksia on paljon.

3. Digitaalisiin ympäristöihin liittyvät sovellutukset

Digitaalinen markkinointi hyödyntää lähes poikkeuksetta Internetiä jollakin tavalla, ja siitä onkin tullut lähestulkoon synonyymi verkkomarkkinoinnin kanssa. SMS-viestit ja sähköpostit jäävät tämän tutkielman ulkopuolelle, samoin kuin sosiaalisessa mediassa tapahtuva markkinointi. Sen sijaan keskityn tässä webin kenties tyypillisimpiin mainostamiskanaviin, joita ovat mainosbannerit verkkosivuilla, tekstimainokset osana hakukoneiden tulossivuja tai tavallisia verkkosivuja sekä videoihin sisällytetyt mainokset.

3.1. Banner blindness

Internetissä mainostamisen vanhimpiin ja tunnetuimpiin ongelmiin kuuluu ilmiö nimeltä 'banner blindness' eli bannerisokeus, joka käytännössä tarkoittaa sitä, että webin käyttäjät ovat oppineet jättämään mainosbannerit ja samalla myös mainoksilta vaikuttavat sisällöt huomiotta (Benway & Lane, 1998).

Katseenseurantaa soveltavat banner blindness -tutkimukset, mm. Resnick & Albert (2014), ovat viime vuosina tarkentaneet ilmiöön liittyviä syy-seuraussuhteita ja piirteitä: bannerisokeus on vahvimmillaan, kun mainos on sijoitettu sivun oikeaan laitaan tai jos käyttäjä on suorittamassa jotakin päämäärähaikuista tehtävää.

Resnickin ja Albertin rekrytoimat koehenkilöt olivat länsimaalaisia, mikä osin selittää visuaalisen huomion painottumista ylös ja sivuille – länsimaalaisissa kulttuureissahan luetaan useimmiten ylhäältä alas ja vasemmalta oikealle.

Toisaalta myös mainosbannerien sijoituspaikat sivustojen sisällä ovat melko vakiintuneet – yleisimpiä länsikulttuureissa ovat sivun ylälaita ja oikea reuna – joten käyttäjät ovat arvatenkin oppineet jättämään nämä paikat vähemmälle huomiolle.

Toinen vahva tekijä on toiminnan konteksti. Tehtävän suorittaminen siis vahvasti bannerisokeuden vaikutusta, vastakohtana sivuston vapaamuotoiselle havainnoinnille. Kun koekäyttäjien annettiin katsella sivustoa rauhassa ilman aikarajoitusta, he eivät enää erityisemmin vältelleet mainossisältöä, joten asiayhteydellä ja tehtävällä on merkitystä.

Hervet ja Guérard (2011) puolestaan selvittivät tekstimainoksiin keskittyvässä katseenseurantakokeessaan, missä määrin käyttäjät katsovat web-sivustoihin integroituja tekstimainoksia, ja jos katsovat, niin muistavatko he niiden sisällöstä mitään. Koehenkilöille annettiin ohjeeksi lukea kameroita koskeva teksti siten, että he ovat sen luettuaan valmiita vastaamaan tekstin sisältöä koskeviin kysymyksiin. Suurin osa, 82%, osallistujista kohdisti katseensa vähintään

yhteen neljästä sivulla näkyneestä tekstimainoksesta (kuva 4).



Kuva 4: Adword-tyyliä noudatteleva tekstimainos (Hervet & Guérard, 2011)

Hieman yllättävää tässä oli se, että tekstimainokset huomattiin näinkin hyvin, vaikka tehtävänä oli nimenomaan sivun varsinaisen tekstisisällön sisäistämiseen pyrkivä lukeminen eikä suinkaan sivun vapaamuotoinen katselu. Huomion kiinnittyminen ei tosin vielä taannut, että mainoksen sisältöä olisi muistettu.

Kokeen toinen tavoite oli selvittää, onko tekstimainosten kongruenssilla, eli niiden sisällön yhteneväsyydellä sivun varsinaiseen sisältöön, merkitystä mainossisällön huomaamiseen tai muistamiseen. Tulokset osoittivat, että ensimmäinen nähty mainos muistettiin paremmin kuin muut, mutta vain jos sen sisältö liittyi sivun varsinaiseen sisältöön. Sijainti yksin vaikutti siis vain mainoksen huomaamiseen, muttei sen muistamiseen. Toisaalta mainostekstin sisällöllinen yhtenevyys ei yksin vaikuttanut mainoksen huomaamiseen. Vasta hyvän sijainnin ja yhtenevän sisällön yhdistelmä antoi tuloksen, jota voisi olettaa mainostajan haluavan: Mainosteksti sekä luettiin että muistettiin.

Tekstimainosten kohdentaminen lienee siis kannattavaa, ainakin jos sivuston käyttäjien odotetaan harjoittavan enimmäkseen jotakin tehtävähakuista käytöstä, kuten esimerkiksi juuri artikkelin lukemista tai tietyn tuotteen etsimistä.

Hervet ja Guérard (2011) ehdottavat tutkimuksensa pohdintaosiossa selvän eron tekemistä mainoksen näkemiselle ja sen sisällön muistamiselle. Se, että koehenkilö ei muista mainosbannerin sisältöä, ei tarkoita, etteikö hän olisi sitä nähnyt. Banner blindness onkin terminä hiukan sekoittunut merkitykseltään, kun sen mittarina käytetään toisinaan fiksaatioita, toisinaan sisällön muistamista, ja toisinaan näiden yhdistelmää. Katseenseuranta lieneekin ainoa keino varmistua, johtuuko muistamattomuus näkymättömyydestä, vai tuleeko syytä etsiä muualta.

Edellä mainittujen katseenseurantatutkimusten valossa vaikuttaisi siltä, että

mainostajien kannalta voisi olla kehittävämpää murehtia fiksaatioiden määrää ja pituutta hieman vähemmän, ja sen sijaan keskittyä tutkimaan sitä, miten mainokset jäisivät paremmin mieleen. Ilmeisesti eräs toimiva keino on Hervetin ja Guérardin sivuama mainosviestien sisällöllinen kohdentaminen mielekkäillä tavoilla sivun varsinaisen sisällön kanssa, sijainnin tärkeyttä unohtamatta. On kuitenkin pidettävä mielessä, että tämän tutkimuksen tulokset koskivat nimenomaan tehtävähakuista toimintaa, ja havainnot eivät välttämättä päde sellaisenaan sivustoihin, joita käyttäjät tyypillisesti selailevat vailla varsinaista päämäärää.

Kenties juuri kohdistetun luonteensa ja visuaalisen hierarkian kannalta edullisen sijaintinsa (Faraday, 2000) vuoksi hakukoneiden tulossivuilla (*SERP, search engine results page*) esiintyvät tekstimainokset ovat verraten immuuneja bannerisokeudelle (Hall-Phillips et al., 2013). Samassa tutkimuksessa selvisi, että Googlen SERP-sivun 'sponsoroidut tulokset' eli tekstimuotoiset, kohdennetut mainokset kilpailevat suoraan huomiosta itse hakutulosten kanssa – mainoksia sisältävällä tulossivulla 10% fiksaatioista kohdistui mainoksiin ja 66% hakutuloksiin, kun ilman mainoksia 76% fiksaatioista osui hakutuloksiin. Toisin sanoen mainosten saaman huomion osuus siirtyi sellaisenaan hakutuloksiin. Mainostuloksiin kohdistuvat fiksaatiot olivat tosin hiukan lyhytkestoisempia, mutta ne joka tapauksessa vähensivät varsinaisiin hakutuloksiin kohdistuvaa huomiota: mainoksettomalla tulossivulla koehenkilöt katsoivat keskimäärin yhdeksää hakutulosta, ja mainosten läsnäolo vähensi lukumäärän kuuteen. Onneksi sponsoroidut hakutulokset ovat usein hyödyllisiä hakutehtävän kannalta tai muuten esimerkiksi Google-haun voisi katsoa sabotoivan itseään hajauttamalla huomio ”todellisten” ja maksettujen hakutulosten kesken.

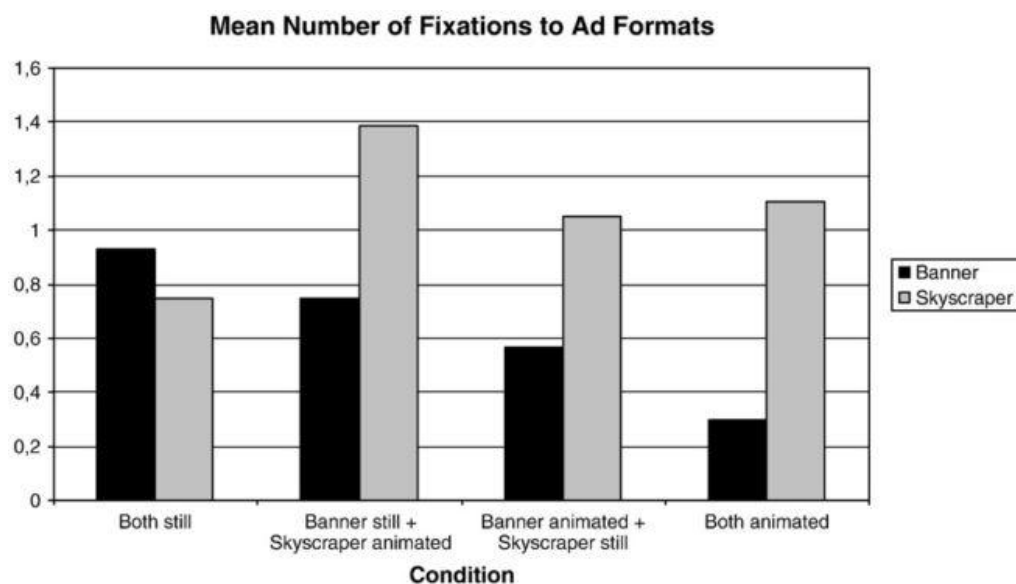
Tämän tutkielman ulkopuolelle jää kysymys siitä, onko mainosbannerin ensisijainen tehtävä jäädä mieleen vai tulla klikatuksi. Olisi mielenkiintoista tietää, mitä katseenseurantametodit yhdessä neurologisen datan kanssa kertoisivat mainosten klikkaamiseen ja vastaavasti muistamiseen johtavista piirteistä. Joka tapauksessa bannerisokeus näyttäisi uusimpienkin tutkimusten valossa olevan edelleen hyvin relevantti ilmiö, joka tulisi huomioida, kun tehdään arvioita erityyppisten web-mainosten tehokkuudesta.

3.2. Web-mainonnan tehokkuuden arvioiminen

Jos bannerisokeus vaikuttaa mainoksen tehokkuuteen, niin mainoksen sijainti vastaavasti vaikuttaa bannerisokeuden ilmenemiseen. Michailidou ja muut (2014) toteuttivat pilottitutkimuksen projektille, jonka päämäärä on luoda katseenseurantatutkimusten pohjalta menetelmä parhaiden mainospaikkojen tun-

nistamiseksi kyproslaisilta web-sivuilla. Tutkimuksessa verrattiin ammattilaisten arvioita mainossijaintien huomioarvosta katseenseurannalla kerättyyn dataan todellisesta visuaalisesta huomiosta. Selvisi, yritysten markkinointijohdossa toimivat asiantuntijat arvioivat eri mainospaikkojen (kolme eri sijaintia kolmella eri sivulla) huomioarvot keskimäärin ainakin järjestyksellisesti oikein, mutta myös melko johdonmukaisesti liian suuriksi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että katsedataa hyödyntämättömien asiantuntija-arvioiden varassa toimivat yritykset maksavat helposti mainospaikoista ylihintaa arvioidessaan katseuiden lukumäärän liian suureksi.

Mainosbannerien ominaisuuksista ja niiden erinäisistä vaikutuksista riittää tutkittavaa vielä pitkäksi aikaa. Kuisma ja muut (2010) tutkivat, kuinka animaatio tai sen puute sekä bannerin vaaka- tai pystyformaatti vaikuttavat mainoksen huomaamiseen ja muistamiseen. Hieman yllättäen animaation vaikutus olikin riippuvainen mainoksen formaatista – animointi lisäsi web-sivun tekstiä lukevien koehenkilöiden visuaalisen huomion kiinnittymistä pystysuuntaisiin mainoksiin, mutta vastaavasti vähensi sitä vaakasuuntaisten bannereiden kohdalla (kuva 5). Tätä vastoin animaatio edesauttoi bannerityyppisten mainosten muistamista, mutta ei aiheuttanut vastaavaa vaikutusta pystysuuntaisille mainoksille. Kyseistä tutkimusta voinee pitää esimerkkinä siitä, kuinka katseenseuranta ei metodina ainoastaan anna vastauksia vanhoihin ikuisuuskysymyksiin vaan herättää jatkuvasti myös uusia kysymyksiä.



Kuva 5: Animaation vaikutus vaakasuuntaisiin (banner) ja pystysuuntaisiin (skyscraper) mainoksiin (Kuisma et al., 2010)

3.3. Muita digitaalisen markkinoinnin tutkimuskohteita

Nykyisin huomattava osa Internetin sisällöstä on videomuodossa, ja luonnolli-

sesti myös videosisältöön integroidaan usein mainoksia. Eräs tekniikka on videomuotoisten mainosten näyttäminen muun videosisällön lomassa, jolloin eräs ongelma on, missä kohti videosisältöä mainos kannattaisi näyttää. Yadati ja muut (2013) ehdottavat metodia, jolla pupillien laajentumasta ja kasvon ilmeestä saatavan, reaaliaikaisen datan perusteella olisi mahdollista näyttää käyttäjän silloisesta tunnetilasta riippuen joko neutraali tai positiivinen mainos. Tällaisen konseptin käyttöönotto toki vaatii, että käyttäjien kotona on esimerkiksi pupillien laajenemisen tai jonkin muun, tunnetilaa ilmaisevan osoittimen havaitsemiseen kykenevää teknologiaa.

Eräs kiintoisa, katseenseurannasta hyötyvä tutkimuskohde on erilaisten kohorttien, kuten ikäryhmien erot mieltymyksissä ja käyttäytymisessä.

Esimerkiksi Djasbi ja muut (2010) saivat katse- ja kyselydataa käyttäen selville, että amerikkalaiset Y-sukupolven edustajat ovat mieltyneet erityisesti verkkosivuihin, joilla on suuri kuva, vähän tekstiä, hakutoiminto ja kuva julkisuuden henkilöstä. Suuret ikäluokat suosivat samaten tekstin vähyyttä ja kuvien runsautta. Eroja ikäryhmien välillä sen sijaan löytyi visuaalisen huomion kohdistumisessa: vanhemmalla sukupolvella vaikuttaa olevan enemmän kärsivällisyyttä visuaalisissa hauissa, toisin sanoen nuorempi polvi kyllästyy nopeammin etsimään katseellaan haluamaansa kohdetta, etenkin jos ruudulla näkyy paljon erilaisia visuaalisia elementtejä. (Djasbi et al., 2011)

Tämän kaltainen tutkimustieto lieenee arvokasta, jos tavoitteena on esimerkiksi suunnitella verkkokauppa tietyille ikäryhmälle, tai ylipäänsä huomioida mahdollisimman hyvin eri avainryhmien mieltymykset vaikkapa yrityksen web-läsnäoloa ajatellen.

4. Fyysisiin ympäristöihin liittyvät sovellutukset

Teknologian kehityksen myötä markkinoille on tullut yhä helpommin kannettavia laitteita, mikä puolestaan on mahdollistanut tutkimuksiin osallistuvien henkilöiden mobilisoinnin paremmin aitoa ympäristöä vastaaviin olosuhteisiin, tai täysin aitoon ympäristöön, kuten tavarataloon. Aidompi konteksti ja vähemmän invasiivinen tai kömpelö koevarustelu auttanevat tuottamaan aikaisempaa validimpia tutkimustuloksia ja vähentämään häiriötekijöitä.

Kvantitatiivista katseentutkimusdataa interaktiivisista, luonnollisista tai luonnollisenkaltaisista ympäristöistä ei vielä ole kerääntynyt kovin laajasti (Peters & Itti, 2008), mutta aika korjanee tämän epäkohdan.

4.1. Ihmisryhmien erityispiirteet

Rahulan ja muut (2013) pyrkivät selvittämään, minkälaisia eroja eri sukupolvien, tässä tapauksessa yhdysvaltalaisien suurten ikäluokkien (*baby boomers*) ja y-sukupolven edustajien välillä saattaisi olla, kun heidän tehtävänä on tehdä ostopäätös eri tuotteiden, tässä tapauksessa urheiluun tarkoitettujen kompresiovaatteiden, välillä. Koehenkilöt varustettiin päähän puettavalla katseenseurantajärjestelmällä, joka tallensi videon henkilön näkökulmasta sekä katseen suunnan suhteessa em. videokuvaan.

Koehenkilöt katselivat ensin tyypillisiä, tekstiä sisältäviä promootiokuvia tuotteista, sitten katselivat itse tuotetta pakkauksineen ja vielä arvioivat tuotteita fyysisen kosketuksen avulla. Ryhmien välillä löytyi eroja: nuorempi ikäryhmä käytti enemmän aikaa mainoskuvien katseluun ja keskittyi myös enemmän kuvien informaatioisisältöön. Kun koehenkilöt katselivat tuotteita koskematta niihin, ikäryhmien välillä ei ollut merkittäviä eroja visuaalisen mielenkiinnon suuntautumisessa. Kun koehenkilöt pääsivät käsin tarkastelemaan tuotteita, y-sukupolven edustajat käyttivät jälleen enemmän aikaa saatavilla olevan informaation omaksumiseen.

Testin ensimmäisessä osassa vinoumaa saattoi aiheuttaa mainoskuvissa käytettävien mallien samanikäisyys nuoremman kohortin kanssa, jolloin samaistuminen saattoi vaikuttaa mielenkiintoon. Samoin viimeisessä vaiheessa vanhemman sukupolven informaation omaksumista osin vaikeutti tuotepakkausten pieni teksti, jota joidenkin oli hankala lukea. Toisaalta kokeen tärkeimmät havainnot puoltavat aikaisempia, ilman katseenseurantadataa saatuja tuloksia kyseisten ikäryhmien ominaispiirteistä.

Tämä tutkimus on hyvä osoitus siitä, kuinka katseenseuranta mahdollistaa suoran vertailun erilaisten ihmisjoukkojen välillä siten, että itseraportointi ei ole pääasiallinen datan lähde, vaan lähinnä auttaa raahan, kognitiivisesti ”suodattamattoman” katsedatan tulkitsemisessa sekä syy-seuraussuhteiden löytämisessä. Katsedata toi tässä tapauksessa myös vahvistusta aiemmissa, katsedataa hyödyntämättömissä tutkimuksissa tehdyille havainnoille. Katsedata lieneekin hyödyllinen apuväline monenlaisten kognitiota ja käytöstä koskevien aiempien käsitysten ja teorioiden vahvistamiseen tai kumoamiseen.

4.2. Valintaprosessit

van der Laan ja muut (2015) tutkivat, onko ensimmäisellä fiksaatiolla vaikutusta valintaan eri tuotemerkkien välillä, ts. onko sillä tuotteella etu, joka onnistuu vangitsemaan kuluttajan katseen ensimmäisenä. Kokeessa manipuloitiin ensimmäisen fiksaation kohdistuminen keinotekoisella visuaalisella ärsykkeellä en-

nen tuotekuvien näyttämistä, mutta merkittävää vaikutusta tuotteen valintaan tällä ei ollut. Toisaalta kaikki osallistujat olivat naispuolisia opiskelijoita, joten tutkimus olisi hyvä toistaa erilaisilla kohorteilla.

Wästlund ja muut (2015) järjestivät käytännön kokeita aidoissa ympäristöissä – bensa-asemalla, urheiluvälinekaupassa ja ruokakaupassa – ja totesivat, että koehenkilöiden katselutavat riippuivat paitsi ostotehtävän luonteesta (suunniteltu – ei suunniteltu), myös siitä, kuinka paljon tarkkaavaisuutta aikaisemmat tehtävät olivat vaatineet. Toisin sanoen monimutkaiset ostotehtävät kuormittavat kognitiivisia resursseja, minkä johdosta seuraavien tehtävien kohdalla visuaalinen tarkkaavaisuus alkoi jo herpaantua. Monimutkaisempaa valintaheuristiikkaa käyttävä asiakas siis tutkii ensin tarkemmin, mutta sitten väsyä. Olisi siis hyödyllistä, jos asiakkaan aikomus voitaisiin tunnistaa etukäteen, ja tukea valintojen tekemistä kulloisenkin tilanteen vaatimalla tavalla.

Aikeista voitaisiin päästä jyvälle esimerkiksi hyödyntämällä oppivia algoritmeja katsedatan yhteydessä, jolloin voisi olla mahdollista ennakoida jollakin tasolla asiakkaan tulevaa käytöstä, esimerkiksi tunnistamalla ja kategorisoimalla ostostapahtuma rutiini- tai impulssiostokseksi (Lufimpu-Luviya et al., 2014).

4.3. Tuotteiden ominaisuudet

Tuotepakkausten ja itse tuotteiden ominaisuudet eivät ole yhdentekeviä, kun kuluttajat tekevät valintoja kauppojen käytävillä. Marketin hyllyssä olevalla tuotepakkauksella on hyvin lyhyt aika, erään tutkimuksen mukaan keskimäärin noin 2,5 sekuntia, välittää kuluttajalle haluttu viesti (Spence & Piqueras-Fiszman, 2012).

Aiempana mainitut (kuva 2) hillopurkit liittyvät tutkimukseen, jossa Piqueras-Fiszman ja muut (2013) keräsivät katseenseurantadataa ja sana-assosiaatioita yhteensä 16 erilaisesta hillopurkin variaatiosta. Esimerkiksi etiketissä oleva kuva herätti odotetusti positiivisia, hedonisia assosiaatioita ja vaikuttivat samaten positiivisesti koehenkilöiden raportoimaan haluun kokeilla tuotetta. Purkin aaltoileva pinta puolestaan vaikutti visuaalisen huomion leviämiseen laajemmalle alueelle ja niin edelleen.

Katsedata ja henkilöiden raportoimat assosiaatiot vaikuttavat sellaiselta yhdistelmältä, jonka avulla olisi mahdollista räätälöidä tuotepakkaukseen halutunlainen markkinointiviesti, ainakin jonkinlaisen iteratiivisen testauskierrosten myötä.

Seuraavaa askelta edustanee neurologinen data, jota mm. Khushaba ja muut (2013) käyttivät tutkiessaan, minkälaista dataa EEG:n avulla on mahdollista saada, kun koehenkilöt tekevät valintoja tuotteiden, tässä tapauksessa tietoko-

neen ruudulle piirrettyjen suolakeksien, eri ominaisuuksien välillä. EEG-mitauksella saadut tulokset aivojen alueiden aktivoitumisesta eri taajuualueilla ovat asiaan perehtymättömälle vaikeaselkoisia, mutta matemaattisen analyysin lopputuloksena saatiin tässä tapauksessa todella selville, mitkä tuotteen ominaisuudet olivat tärkeimpiä – valinta keksien makujen tai kuorrutusten välillä sai aikaan voimakkaampia reaktioita kuin keksien muodot. Neurologisen datan hyödyntämisessä laitteistojen kalleuden jälkeen seuraava ongelma saattaakin olla korkean ammattitaidon tarve tuloksien tulkinnassa.

Katseenseurannan hyödyntämiseksi keksitään toki jatkuvasti myös uusia keinoja. Ballings ja Poel (2013) ehdottavat mobiililaitteisiin kenties tulevaisuudessa integroitavan katseenseurannan hyödyntämistä siten, että mainosten katselun aikana kerätyllä datalla voitaisiin ennustaa esimerkiksi palveluntarjoajien asiakasvaihtuvuutta, ja jopa reagoida ennalta ottamalla ”siirtymävaarassa” oleviin asiakkaisiin kontakti.

5. Yhteenveto ja pohdinnat

Katseenseuranta on oivallinen väline visuaalisen markkinoinnin tutkimusongelmien ratkomiseen, kunhan sitä käytetään oikein ja sen rajoitteet pidetään mielessä. Perinteisesti katseenseuranta teknologiana on soveltunut parhaiten sellaisiin asiayhteyksiin, joissa henkilö pysyy paikallaan. Teknologian kehityksen myötä laitteet on mahdollista pukea koehenkilön päälle, jolloin voidaan lähteä tekemään tutkimusta jopa ”kenttäolosuhteissa”, kuten myymäläolosuhteissa. Erityisen mielenkiintoista olisikin nähdä, mitä tapahtuu kun tällaisiin *in-situ* -tutkimuksiin oletettavasti saadaan tulevaisuudessa myös yhä tarkempaa neurologista dataa mukaan.

Katseenseurantadatan tulkitseminen vaatii useimmiten seurakseen myös jonkinlaista koekäyttäjien raporttoimaa tietoa, jotta havaintoja voidaan tulkita ja syy-seuraussuhteet selvittää parhaalla mahdollisella tarkkuudella. Käyttäjien itse raporttoimassa piilee kuitenkin väistämättä epätarkkuuksia muun muassa erilaisista kognitiivisista vinoumista sekä omien ajatusprosessien ilmaisemisen vaikeudesta johtuen.

Neurologinen data on oikein käytettynä erittäin käyttökelpoinen ja itseraportointia tarkempi, mutta toistaiseksi melko kallis lisä katseenseurantatutkimuksiin. Ongelmana on myös se, että neurologisen datan kerääminen ja etenkin tulkitseminen vaatii erityistä täsmällisyyttä ja ammattitaitoa. Katsedaan voitaisiin toisaalta yhdistää myös koehenkilön reaaliaikaista fysiologista dataa, kuten sydämen syke, hengitys tai ihon sähkönjohtavuus. Esimerkiksi sydämen sykkeen nousut ja laskut tai ihon sähkönjohtavuuden muutokset voivat kertoa henkilön tunnetilasta ja sen muutoksista.

Eräs potentiaalinen tutkimuskysymys saattaisi liittyä siihen, voiko fysiologista dataa käyttää halvempaan vaihtoehtona, jos vaikkapa ensin luotaisiin jonkinlainen viitekehys erilaisille tavoitekokemuksille tallentamalla ja analysoimalla neurologista ja fysiologista dataa rinnakkain.

Viiteluettelo

- Ballings, M., & Poel, D. Van den. (2013). Using eye-tracking data of advertisement viewing behavior to predict customer churn. In *Proceedings of the 13th International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, IEEE (pp. 201–205).
- Benway, J. P., & Lane, D. M. (1998). Banner blindness: Web searchers often miss “obvious” links. *Internetworking, ITG Newsletter*.
- Calvert, G., & Brammer, M. (2012). Predicting consumer behavior: using novel mind-reading approaches. *IEEE Pulse*, 3(3), 38–41.
- Djamasbi, S., Siegel, M., Skorinko, J., & Tullis, T. (2011). Online viewing and aesthetic preferences of generation y and the baby boom generation: testing user web site experience through eye tracking. *International Journal of Electronic Commerce*, 15(4), 121–158.
- Djamasbi, S., Siegel, M., & Tullis, T. (2010). Generation Y, web design, and eye tracking. *International Journal of Human-Computer Studies*, 68(5), 307–323.
- Duchowski, A. (2007). *Eye tracking methodology*. London: Springer.
- Faraday, P. (2000). Visually critiquing web pages. In *Multimedia '99 Proceedings of the Eurographics Workshop in Milano, Italy, September 7–8, 1999* (pp. 155–166). Springer Vienna.
- Guo, F. Y. (2009). User experience research and management of online advertising and merchandising. *Internationalization, Design and Global Development*, 457–466.
- Hall-Phillips, A., Yang, R. R., & Djamasbi, S. (2013). Do ads matter? An exploration of web search behavior, visual hierarchy, and search engine results pages. In *Proceedings of the 46th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, (pp. 1563–1568).
- Hayhoe, M. (2004). Advances in relating eye movements and cognition. *Infancy*, 6(2), 267–274.
- Hervet, G., & Guérard, K. (2011). Is banner blindness genuine? Eye tracking internet text advertising. *Applied Cognitive Psychology*, 25(5), 708–716.

- Hoffman, J. E. (1998). Visual attention and eye movements. *Attention*, (31), 119–153.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., & van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford University Press.
- IAB, & PwC. (2014). IAB internet advertising revenue report 2014 first six months results, (October).
- Karslake, J. S. (1940). The Purdue eye-camera: a practical apparatus for studying the attention value of advertisements. *Journal of Applied Psychology*, 24(4), 417–440.
- Khushaba, R. N., Wise, C., Kodagoda, S., Louviere, J., Kahn, B. E., & Townsend, C. (2013). Consumer neuroscience: Assessing the brain response to marketing stimuli using electroencephalogram (EEG) and eye tracking. *Expert Systems with Applications*, 40(9), 3803–3812.
- Kuisma, J., Simola, J., Uusitalo, L., & Öörni, A. (2010). The effects of animation and format on the perception and memory of online advertising. *Journal of Interactive Marketing*, 24(4), 269–282.
- Lufimpu-Luviya, Y., Drap, P., Merad, D., Baccino, T., Draï-Zerbib, V., & Fertil, B. (2014). Identification of purchasing scenarios through eye-tracking features. In *Proceedings of the International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication*. ACM (pp. 1131–1140).
- Michailidou, E., Christoforou, C., & Zaphiris, P. (2014). Towards predicting ad effectiveness via an eye tracking study. In *Proceedings of HCI in Business: First International Conference, HCIB 2014* (pp. 670–680).
- Morin, C. (2011). Neuromarketing: The new science of consumer behavior. *Society*, 48(2), 131–135.
- Nielsen, J. (2007). Banner blindness: Old and new findings. Retrieved from <http://www.nngroup.com/articles/banner-blindness-old-and-new-findings/>
- Pernice, K., & Nielsen, J. (2009). How to conduct eyetracking studies. *Nielsen Norman Group*.
- Peters, R., & Itti, L. (2008). Applying computational tools to predict gaze direction in interactive visual environments. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 5(2), 1–21.
- Piqueras-Fizman, B., Velasco, C., Salgado-Montejo, A., & Spence, C. (2013). Using combined eye tracking and word association in order to assess novel packaging solutions: A case study involving jam jars. *Food Quality and Pref-*

erence, 28(1), 328–338.

- Rahulan, M., Troynikov, O., Watson, C., Janta, M., & Senner, V. (2013). Consumer purchase behaviour of sports compression garments – a study of generation y and baby boomer cohorts. *Procedia Engineering*, 60, 163–169.
- Resnick, M., & Albert, W. (2014). The impact of advertising location and user task on the emergence of banner ad blindness: an eye-tracking study. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 30(3), 206–219.
- Rothkopf, C., Ballard, D., & Hayhoe, M. (2007). Task and context determine where you look. *Journal of Vision*, 7(14), 16.
- Schmutz, P., Roth, S. P., Seckler, M., & Opwis, K. (2010). Designing product listing pages—Effects on sales and users' cognitive workload. *International Journal of Human-Computer Studies*, 68(7), 423–431.
- Spence, C., & Piqueras-Fiszman, B. (2012). The multisensory packaging of beverages. *Food Packaging: Procedures, Management and Trends*, 187–233.
- Vakratsas, D., & Ambler, T. (1999). How advertising works: what do we really know? *Journal of Marketing*, 63(1), 26–43.
- Van der Laan, L. N., Hooge, I. T. C., de Ridder, D. T. D., Viergever, M. A., & Smeets, P. A. M. (2015). Do you like what you see? The role of first fixation and total fixation duration in consumer choice. *Food Quality and Preference*, 39, 46–55.
- Wedel, M., & Pieters, R. (2008a). A review of eye-tracking research in marketing. In N. K. Malhotra (Ed.), *Review of Marketing Research, Volume 4* (pp. 123–147). Emerald Group Publishing Limited.
- Wedel, M., & Pieters, R. (2008b). *Eye tracking for visual marketing*. Now Publishers Inc.
- Wästlund, E., Otterbring, T., Gustafsson, A., & Shams, P. (2015). Heuristics and resource depletion: eye-tracking customers' in situ gaze behavior in the field. *Journal of Business Research*, 68(1), 95–101.
- Yadati, K., Katti, H., & Kankanhalli, M. (2013). Interactive video advertising: A multimodal affective approach. *Advances in Multimedia Modeling*, 106–117.
- Yarbus, A. L. (1967). *Eye movements and vision*. (L. A. Riggs, Ed.). New York: Plenum Press.
- Zurawicki, L. (2010). *Neuromarketing: Exploring the brain of the consumer*. Springer.

Toimittajalukkiutuminen tietojärjestelmähankinnassa

Julius Torkkeli

Tiivistelmä

Valtaosa yrityksistä ostaa tietojärjestelmänsä ulkoiselta toimittajalta. Ulkoistamiseen liittyy aina riskejä ja erityisesti tietojärjestelmien suhteen sellainen on lukkiutuminen tiettyyn toimittajaan – toimittajalukkiutuminen. Vuonna 2013 tehdyssä kyselytutkimuksessa, jonka tarkoitus oli kartoittaa suomalaisen tietojärjestelmähankinnan tilaa, ilmaistiin huoli suomalaisyritysten heikohkosta innosta huomioda toimittajalukkiutuminen uusia tietojärjestelmiä hankittaessa. Toimittajalukkiutumisen tarkempi määrittely ja selvitys sen epätoivottavista vaikutuksista jäivät kuitenkin tekemättä. Tässä tutkimuksessa pyritään kirjallisuuden perusteella muotoilemaan, mitä toimittajalukkiutuminen tarkoittaa, miten se muodostuu ja millaisia vaikutuksia sillä on yrityksen toimintaan.

Toimittajalukkiutumisen pääasialliset syyt vaikuttavat olevan toimittajan vaihtamisesta seuraavat erilaiset vaihtokustannukset. Vaihtokustannukset muodostuvat hyvin monesta eri tekijästä ja niiden kokonaisvaltainen hallitseminen osoittautuu yrityksen toiminnan kannalta jopa elintärkeäksi. Samalla myös vaihtokustannusten minimointi vähentää riskiä toimittajalukkiutumiseen. Lisäksi tutkimuksessa pohditaan, mitä ominaisuuksia juuri tietojärjestelmähankinnalla on toimittajalukkiutumisen suhteen. Miksi toimittajalukkiutumisesta puhutaan usein informaatioteknologioiden yhteydessä?

Tutkimusmenetelmänä käytetään narratiivista kirjallisuuskatsausta eli ilmiötä pyritään kuvailemaan kirjallisuudesta löytyvien lähteiden perusteella. Menetelmän johdosta mitattavaa tulosta tai toistettavissa olevaa järjestelmällistä tukimusta ei yritetäkään tuottaa. Tutkimusalueena on yritysten välinen tilaaja-toimittaja -yhteistyö ja näkökulmana on tilaajan näkökulma. Tutkimuksen lopussa pyritään määrittelemään tapoja ja tekniikoita, joita yrityksillä on käytössään toimittajalukkiutumisen hallitsemiseksi sekä arvioidaan avoimien standardien ja avoimen lähdekoodin kehityksen vaikutuksia toimittajalukkiutumiseen.

Avainsanat ja -sanonnat: toimittajalukkiutuminen, tietojärjestelmähankinta

CR-luokat: J.1, J.4

1. Johdanto

Olemme tottuneet uutta autoa ostaessamme, että edellisen auton merkillä ei ole erityisen paljon merkitystä uuden auton käyttöönoton kannalta. Ostamme sit-

ten saman- tai erimerkkisen uuden auton, mitä todennäköisimmin meidän ei tarvitse opetella uuden auton ajamista uudelleen, hankkia uutta peräkärriä uuteen autoon tai remontoida autotallia uuteen uskoon. Automerkin vaihtamisesta ei yleensä synny merkittäviä kustannuksia tai vaivaa uuden auton hintaa lukuun ottamatta.

Informaatioteknologian yhteydessä tilanne on kuitenkin usein toinen. Yritys, joka ostaa ohjelman osaksi toiminnanohjausjärjestelmäänsä, ei voi olla ottamatta huomioon millaisen ohjelmiston ja keneltä sen tilaa. Mikäli näin ei tehdä, mitä todennäköisimmin uusi ohjelmisto ei kykene minkäänlaiseen yhteistyöhön yrityksen muiden järjestelmien kanssa. Vaikka yritys vaihtaisi koko tietojärjestelmänsä uuteen, huomataan taas pian, että vanhassa tietojärjestelmässä on runsaasti tietoa, jota ei saisi hukata ja joka pitäisi saada talteen myös uuteen järjestelmään. Tästäkin prosessista seuraa kuluja ja vaivaa. Kaiken lisäksi uusi tietojärjestelmä onkin käytöltään aivan erilainen kuin edellinen, ja henkilöstö ei välttämättä osaa automaattisesti käyttää järjestelmää. Tarvitaan koulutusta ja opiskelua, mikä vie myös aikaa ja rahaa. Lopulta yritys huomaa, että uuden järjestelmän asentamisesta seuraa aivan liikaa erilaisia kuluja, eikä sillä ole edes varaa vaihtaa järjestelmästä toiseen. Tietojärjestelmän vanhan toimittajan kanssa jatketaan ylläpitosisopimusta ja mitään ei tapahtunutkaan.

Edellä mainittuja yrityksen kohtaamia kustannuksia kutsutaan vaihtokustannuksiksi, joita seuraa yritysten välisen yhteistyösopimuksen lopettamisesta ja uuden yhteistyön aloittamisesta [Whitten et al., 2010]. Kun yritys kohtaa huomattavan suuret vaihtokustannukset vaihtaessaan toimittajaansa, voidaan sanoa, että yritys on toimittajalukkiutunut [Shapiro and Varian, 1998; Davis et al., 2006; Zhu and Zhou, 2010].

Vuonna 2013 tehdyssä kyselytutkimuksessa [Celkee et al., 2013] 47 prosenttia suomalaisissa yrityksissä toimivista tietojärjestelmähankinnasta vastaavista henkilöistä kertoi yrityksensä ottavan toimittajalukkiutumisen huomioon tietojärjestelmien hankinnan yhteydessä aina tai usein. Tutkimuksessa selvisi, että 33 prosenttia vastaajista otti toimittajalukkiutumisen huomioon vain harvoin tai ei koskaan, vaikka se tulisi oikeastaan ottaa aina huomioon järjestelmähankintojen yhteydessä. Tällä perusteella voidaan pitää huolestuttavana, että jopa kolmasosa organisaatioista ei ota toimittajalukkiutumista lähes lainkaan huomioon.

Tutkimuksessa [Celkee et al., 2013] ei kuitenkaan tarkemmin määritelty, mitä toimittajalukkiutuminen tarkoittaa tai miksi ja miten se pitäisi aina ottaa huomioon. Lähes 50 prosenttia suomalaisyrityksistä kuitenkin ottaa toimittajalukkiutumisen huomioon aina tai usein [Celkee et al., 2013], joten ilmiö vaikuttaa olevan kuitenkin merkittävä. Tästä huolimatta Dibbern ja muut [2004] mainitsevat laajassa tietojärjestelmien ulkoistamista käsittelevässä kirjallisuus-

katsauksessaan toimittajalukkiutumisen (eng. *vendor lock-in*) vain muutamaan otteeseen. Vaikuttaa siis siltä, että toimittajalukkiutuminen on tähän astisessa tutkimuksessa otettu huomioon vain sivulauseen tasolla.

Tämän tutkielman tutkimusongelmaksi muodostuu, miten toimittajalukkiutuminen vaikuttaa yrityksen toimintaan ja millaisia tapoja yrityksellä on hallita tilannetta. Tutkimusongelman pohjalta voidaan nostaa esiin seuraavat tutkimuskysymykset:

1. Miten toimittajalukkiutuminen määritellään?
2. Mitkä ovat toimittajalukkiutumisen keskeisimmät vaikutukset?
3. Miten yritys voi välttää toimittajalukkiutumisen tai minimoida sen haitta-vaikutukset?

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten kirjallisuus käsittelee yllä mainittuja kysymyksiä sekä yrityselämän että tiedeyhteisön hyödyksi. Työ toteutetaan narratiivisena kirjallisuuskatsauksena, joten tarkoitus on kuvailla laajalaisesti tutkittavaa ilmiötä olemassa olevan kirjallisuuden perusteella ja luoda mahdollisimman kokonaisvaltainen kuvaileva yhteenveto tutkimuksen kohteesta [Salminen, 2011]. Tutkimustapa ei sisällä systemaattisen kirjallisuuskatsauksen tavoin järjestelmällistä aineiston hankintaa eikä laadullisen tutkimuksen ominaisuudessa tarjoa analyttistä tai mitattavaa tulosta [Salminen, 2011]. Aineistoa on haettu Nelli-portaalista monihakutoimintoa käyttäen aihealueena informaatiotieteet ja vielä tarkennettuna haut tietojenkäsittelytieteisiin. Aineistoa haettaessa on käytetty myös Web of Science-tietokantaa sekä Google Scholar -palvelua. Lisäksi joitakin aineistoja on saatu työn ohjaajalta.

Tutkimuksen pääpainopiste on rajattu yritysten väliseen tietojärjestelmähankintaan. Lähtökohtana on siis organisaation, joka käyttää ulkoiselta toimittajalta tilattua tietojärjestelmää tai muuta ohjelmistoa, näkökulma. Toimittajalukkiutumista voisi käsitellä myös yksittäisen kuluttajan näkökulmasta, mutta tämä näkökulma rajataan tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Myös toimittajalukkiutuminen myyjäosapuolen näkökulmasta jätetään pääosin tarkastelun ulkopuolelle. Myyjäosapuolen näkökulma otetaan huomioon vain siinä määrin kuin se vaikuttaa hankintaa tekevän organisaation valintoihin. Pilvipalveluita käsittelevässä kirjallisuudessa nousi myös vahvasti esiin toimittajalukkiutuminen, mutta osoittautui, että kyse on hieman erilaisesta ilmiöstä. Pilvipalveluiden yhteydessä puhutaan yleensä niin sanotusta datalukkiutumisesta (eng. *data lock-in*), joka tarkoittaa organisaation omistaman tiedon, eli datan, lukkiutumista ulkoiselle palvelimelle esimerkiksi datankäsittelypalvelujen kustannusten noustessa tai yksinkertaisesti teknisen vian vuoksi dataan ei välttämättä aina saada yhteyttä [Satzger et al., 2013; Razavian et al., 2013].

Tutkimuksen toinen luku käsittelee toimittajalukkiutumista ja sen määreitä ja seurauksia. Luvun ensimmäisessä kohdassa pyritään määrittelemään ilmiö

tarkemmin esimerkkien ja kirjallisuudesta löytyvien kuvauksien perusteella. Toisessa kohdassa eritellään, mistä tekijöistä jo mainitut vaihtokustannukset muodostuvat ja johtuvat. Kolmannessa kohdassa etsitään perusteita Shapiron ja Varianin [1998] väitteelle, että toimittajalukkiutuminen on informaatioteknologian alalla suoranaisten normi. Mitä erityispiirteitä siis liittyy tietojärjestelmähankintaan suhteessa toimittajalukkiutumiseen. Neljäs kohta käsittelee toimittajalukkiutumisen vaikutuksia yrityksille.

Kolmannessa luvussa nostetaan esiin kirjallisuudesta löytyneitä tekijöitä, joiden avulla organisaatioiden olisi mahdollista hallita toimittajalukkiutumista ja miten siihen tulisi suhtautua. Luvun tavoitteena on siis vastata kysymykseen, miten toimittajalukkiutuminen voidaan ottaa huomioon organisaation toiminnassa. Neljäs ja viimeinen luku tekee yhteenvedon tutkimuksesta, tarkastelee tutkimuksen merkityksellisyyttä tiedeyhteisön kannalta ja arvioi, millaisia jatkotutkimuskohteita tutkimuksen perusteella voisi nostaa esiin.

2. Toimittajalukkiutuminen

2.1. Mitä on toimittajalukkiutuminen ja mistä se johtuu?

Useimmiten yritykset ostavat tietojärjestelmäratkaisunsa ulkoiselta toimijalta – tietojärjestelmätoimittajalta [Davis et al., 2006]. Tietojärjestelmät ja ohjelmistot ovat kriittisiä työvälineitä yrityksille, joten ei ole yhdentekevää, millaisella tietojärjestelmällä yritys toimii ja millaisia ohjelmia se käyttää. Tästä seuraa, että joskus yrityksen on tarpeellista hankkia uusi tietojärjestelmä, joka voi tarkoittaa myös tietojärjestelmätoimittajan vaihtoa. Tietojärjestelmän vaihtaminen voi olla monimutkainen ja kallis prosessi [Sledgianowski et al., 2008; Ohio Department of Public Safety, 2012]. Tästä prosessista seuraava kustannus on tietojärjestelmän vaihtokustannus ja liian korkea vaihtokustannus voi joskus olla esteenä tietojärjestelmän vaihtamiselle.

Toimittajalukkiutuminen (eng. *vendor lock-in*) tarkoittaa tilannetta, jossa asiakas kohtaa ”huomattavan” (eng. *substantial*) kustannuksen halutessaan vaihtaa tai lopettaa tietyn tuotemerkin tai toimittajan käyttö [Shapiro and Varian, 1998; Zhu and Zhou, 2010]. Toisin sanoen, vaihtokustannus on asiakkaalle liian korkea, jonka vuoksi asiakasorganisaatio joutuu tilanteeseen, jossa se on riippuvuussuhteessa tiettyyn toimittajaan tai tuotemerkkiin [Greenstein, 1997; Shapiro and Varian, 1998; Davis et al., 2006; Zhu and Zhou, 2010]. Riippuvuussuhde taas tarkoittaa sitä, että tietyllä toimittajalla on asiakasorganisaatioon nähden korostuneesti vaikutusvaltaa, eikä asiakasorganisaatio enää kohtaa normaalisti avoimien markkinoiden kilpailutilannetta. Tilanteesta syntyy tietynlainen pienoismonopoli kahden toimijan välille.

Vaihtokustannuksen sitovuus on aina suhteellista sekä yrityksen maksuky-

kyyn että toimittajan tai tuotemerkin vaihtamisesta seuraaviin hyötyihin nähdän. Tämän vuoksi toimittajalukkiutumisella voidaan ajatella olevan aste-eroja. Esimerkiksi täydellinen riippuvuus seuraa siitä, että asiakasorganisaatiolla ei missään tapauksessa ole varaa maksaa vaihtokustannusta. Vaihtoehtoisesti riippuvuus voi olla merkittävää, mutta ei täydellistä, kun asiakasorganisaatiolla on varaa, mutta vaihtokustannus on huomattava. Oleellista kuitenkin on, että vaihtokustannus on tarpeeksi merkittävä vaikuttaakseen asiakasorganisaation strategiaan valintoihin.

Tämän tutkimuksen osalta annamme toimittajalukkiutumiselle seuraavanlaisen määritelmän: *Toimittajalukkiutuminen tarkoittaa tilannetta, jossa asiakasorganisaatio kohtaa käyttämänsä tietojärjestelmän toimittajan vaihtamisesta tai asiakassuhteen lopettamisesta niin merkittävät vaihtokustannukset, että sillä on rajoittava vaikutus asiakasorganisaation strategiaan valintoihin.*

Shapiro ja Varian [1998] tarjoavat yhtenä esimerkkinä 1980-luvun loppupuolella yhdysvaltalaisen operaattori Bell Atlanticin tekemät sijoitukset uusiin AT&T-nimisen toimittajan valmistamiin 5ESS-tyyppisiin puhelinverkkokytkeisiin. Esimerkin kannalta oleellista on, että kytkimet olivat erittäin kallis ja pitkäaikaiseksi tarkoitettu investointi. Samalla AT&T toimitti kytkinten hallintaan käytetyn ohjelmiston, mutta ei ohjelmiston lähdekoodia. Kaupan seurauksena Bell Atlantic joutui tilanteeseen, että aina kun kytkinten toimintaa tarvitsi jotenkin päivittää, muuttaa tai kehittää lisää toimintoja, yhtiö oli täysin riippuvainen AT&T:n ohjelmistopäivityksistä. Mikäli Bell Atlantic halusi saada uusia toimintoja kytkimiinsä, sen tarvitsi siis joko hankkia uudet laitteistot (ja tehdä uudet miljoonien investoinnit) tai tilata ohjelmisto AT&T:ltä, jolla oli nyt mahdollisuus hinnoitella ohjelmistopäivitysten hinta kutakuinkin mielivaltaisesti, jonka se myös teki. [Shapiro and Varian, 1998]

Bell Atlantic oli täten lukkiutunut toimittajaansa, koska vaihtokustannus uusien kytkimien hankkimiseksi olisi ollut sietämättömän korkea. Tilanteesta seurasi, että AT&T:llä oli valta määritellä myymänsä ohjelmiston hinta huomattavasti markkinahintaa kalliimmaksi, sillä Atlantic Bellillä ei käytännössä ollut muuta vaihtoehtoa kuin hyväksyä tarjottu hinta.

2.2. Vaihtokustannukset

Näyttää siltä, että vaihtokustannuksilla on aivan erityinen merkitys toimittajalukkiutumisen syntymisessä. Vaihtokustannukset ovat toimittajan vaihtamisesta seuraavia kustannuksia [Greenstein, 1997; Shapiro and Varian, 1998, Whitten et al., 2010]. Shapiro ja Varian [1998] jaottelevat erilaisia lukkiutumisen tyyppisiä ja niistä seuraavia vaihtokustannuksia, jotka on esitetty taulukossa 1.

Lukkiutumistyyppi	Vaihtokustannukset
Sopimusoikeudelliset sitoumukset	Sopimussakot ja vahingonkorvaukset
Pitkäaikaiset laiteinvestoinnit	Laitteiston vaihtokustannukset
Tuotekohtainen tietotaito, eli tuotteen käyttötaito	Koulutuskulut ja väliaikainen tuottavuuden lasku
Informaatio ja tietokannat	Datan muuntaminen
Erikoistunut toimittaja	Vaihtoehtoisen toimittajan löytäminen
Etsintäkustannukset	Uuden toimittajan etsiminen
Asiakasetuohjelmat	Menetetyt etuisuudet

Taulukko 1. Lukkiutumistyyppit ja vaihtokustannukset [Shapiro and Varian, 1998].

Whitten ja muut [2010] tutkivat vaihtokustannuksia ja niiden vaikutusta tietojärjestelmähankinnoista vastaavien johtajien valintoihin ulkoistamisen jatkamisesta ja toimittajan vaihtamisesta. Tutkimus tehtiin Yhdysvalloissa kenttätutkimuksena, johon osallistui yhteensä 163 tietojärjestelmävastaavaa. Kyseisen tutkimuksen mukaan seuraavien vaihtokustannusten todettiin kannustavan johtajia pysymään yhteistyössä nykyisen toimittajan kanssa.

1. *Jo käytetyt panostukset* (eng. *sunk costs*) eli esimerkiksi vanhaan järjestelmään jo käytetyt resurssit ja panostukset, jotka toimittajaa vaihtaessa menettävät arvonsa. Toisessa lähteessä todetaan, että argumentti ei ole taloudellisesti rationaalinen, mutta mahdollisesti psykologisesti ja emotionaalisesti vaikuttava tekijä [Jones et al., 2002]. Whitten ja muut [2010] toteavat sen silti vaikuttavan johtajien päätöksiin.

2. *Saavutettujen etujen menettäminen*. Tämä viittaa edellisen toimittajan kanssa saavutettuihin etuihin, kuten alennuksiin, vakiintuneisiin käytäntöihin, luottamukseen ja tehokkaaseen palveluun. Whitten ja muut [2010] sisällyttävät tähän myös uuden toimittajan etsimisen, kun taas Shapiro ja Varian [1998] erottavat toisistaan saavutetut edut ja uuden toimittajan etsimisen. Tulkitsemme, että etujen menettäminen on niin sanottu positiivinen ongelma ja siten enemmänkin syy olla vaihtamatta toimittajaa kuin este toimittajan vaihtamiselle. Toisaalta Shapiron ja Varianin [1998] mainitsema uuden toimittajan etsiminen voi olla todellinen este toimittajan vaihdolle.

3. *Uuden järjestelmän aiheuttamat hallinnointikulut*. Järjestelmän vaihtaminen voi heijastua myös muina muuttuvina käytäntöinä, joista voi seurata hallinnollisia uudelleenjärjestelyjä ja sitä myötä kustannuksia.

4. *Epävarmuustekijät*. Vaihdettaessa järjestelmä uuteen kohdataan aina epävarmuustekijöitä. Uuden järjestelmän tuottamia etuja voi olla vaikea arvioida

etukäteen, kun taas mittavat kustannukset ovat varmasti tiedossa. Ottaen huomioon tietojärjestelmän laajan ja merkittävän vaikutuksen yrityksen toimintaan epävarmuus voi olla merkittäväkin kannuste olla vaihtamatta toimittajaa.

5. *Menetetty työskentelytehokkuus ja koulutuskustannukset.* Shapiro ja Varian [1998] mainitsevat myös tämän saman ongelman. Järjestelmän vaihdosta syntyy aina tarve opiskella uuden järjestelmän käyttö. Tämä toteutuu joko väliaikaisena tuottavuuden laskuna, koulutuskustannuksina tai molempina. Lisäksi on todettu, että uuden järjestelmän käyttöönotosta voi seurata huomattavaa muutostavastarintaa työntekijöiden osalta, joka voi nostaa kustannuksia ja viivästyttää uuden järjestelmän käyttöönottoa [Kim, 2011]. Täydennettäköön tämä kohta siis käsittämään myös henkilöstön muutostavastarinta.

6. *Henkilöstönvaihtokulut.* Uuden järjestelmän käyttöönoton myötä myös henkilöstössä voidaan joutua tekemään muutoksia siirtojen tai uusien työntekijöiden muodossa. Tästä seuraa hallinto- ja työnhakukuluja. Henkilöstön mukana voidaan menettää myös arvokasta tietoa ja taitoa, mikäli asiaan ei kiinnitetä riittävästi huomiota [Alaranta and Jarvenpaa, 2010].

Yllä listattujen lisäksi Shapiron ja Varianin [1998] listauksessa on vielä muutama kohta, joita Whittenin ja muiden [2010] listalta ei löydy:

7. *Sopimusjärjestelyt.* Varmasti yksinkertaisin tapa saavuttaa toimittajalukkiutuminen on määräaikainen sopimus toimittajan kanssa. Sopimuksen rikkomisesta seuraa yleensä kustannuksia sakkojen tai muiden oikeudellisten sanktioiden muodossa [Shapiro and Varian, 1998].

8. *Laitteiston vaihtokustannukset sekä datan muuntaminen ja siirto* voidaan tulkita tietojärjestelmien ja ohjelmistojen uusimisessa samaan kategoriaan, koska informaation siirto ja tietojen muuntaminen liittyvät saumattomasti uuden tietojärjestelmän asennukseen. Tietojärjestelmä on tietojärjestelmähankinnassa vastine Shapiro ja Varianin [1998] käyttämälle termille ”laite”. Tähän sisältyy siis kaikki kustannukset liittyen vanhan järjestelmän alas ajoon, uuden asennukseen ja tiedon siirtämiseen näiden välillä. Nämä kustannukset ovat erityisesti tietojärjestelmien ja ohjelmistojen vaihdossa merkittäviä ja tyypillisiä.

9. *Uuden toimittajan etsimiskustannukset.* Uuden toimittajan etsimiseen ja valikoimiseen kuluu väistämättä aikaa ja sitä myöten rahaa. Mitä erikoistuneempaa järjestelmää etsitään, sitä hankalampaa on uuden toimittajan etsiminen.

Huomaamme, että vaihtokustannukset koostuvat huomattavan monesta osatekijästä, joista moni tuskin yksittäisenä aiheuttaa toimittajalukkiutumisen tapaista tilannetta. Kuten sanottua, toimittajalukkiutumisen kannalta oleellista on tietyn kustannusten raja-arvon ylittyminen suhteessa arvioituihin hyötyihin. Vaihtokustannukset kuitenkin muodostuvat useasta eri tekijästä, joista osa sisältää ei-rahallisesti-mitattavia elementtejä, kuten luottamusta, emotiota ja tietoa. Tämä tekee vaihtokustannusten suuruuden arvioinnista haasteellista.

2.3. Toimittajalukkiutuminen ja tietojärjestelmähankinta

Perinteisesti suurin osa yritysten käyttämistä järjestelmistä myydään suljetun koodin järjestelminä eli yritys saa käyttöönsä vain järjestelmän toiminnallisuuden, mutta ei lähdekoodia. Järjestelmä on siis niin sanottu musta laatikko, jonka sisäisestä toiminnasta käyttäjällä, järjestelmän hankkineella yrityksellä, ei ole tietoa [Davis et al., 2006]. Järjestelmän muokkaamiseksi tulee muokata järjestelmän lähdekoodia, johon vain järjestelmän myyneellä toimittajalla on pääsy. Tästä syystä käyttäjä halutessaan muutoksia järjestelmäänsä on lähes täysin riippuvainen järjestelmän toimittajasta, sillä myöskään kolmansilla osapuolilla – kilpailevilla toimittajilla – ei ole pääsyä lähdekoodiin.

Shapiro ja Varian [1998] katsovat, että toimittajalukkiutuminen ja korkeat vaihtokustannukset ovat informaatioteknologiassa normi. Tämä johtuu siitä, että informaatioteknologiassa tietoa käsitellään ja manipuloidaan käyttäen monimutkaisia järjestelmiä, joiden kehittäminen ja ymmärtäminen vaativat erikoistunutta koulutusta [Shapiro and Varian, 1998]. Tämä viittaa siihen, että syy alan, myös tietojärjestelmähankinnan, alttiuteen toimittajalukkiutumiselle on informaatioteknologian teknisessä ja erikoistuneessa luonteessa. Järjestelmien monimutkaisen luonteen takia tilaajan ja toimittajan suhde on tyypillisesti informatiivisesti asymmetrinen. Osapuolien tiedot tai taidot eivät kohtaa [Davis et al., 2006].

Informatiivisesti asymmetrisessä tilanteessa toimittajan on mahdollista hyväksikäyttää tilannetta opportunistisesti esimerkiksi eväämällä tilaajalta tietoa tuotteen tekemisen todellisista kustannuksista ja teknisistä ominaisuuksista [Wathne and Heide, 2000; Wuyts and Geyskens, 2005]. Tekninen ominaisuus voi esimerkiksi olla se, että tilaajan tietojen siirto toisen toimittajan järjestelmään voi olla käytännössä hyvin hankalaa ja kallista tai jopa mahdotonta. Asymmetrian vuoksi tilaajan on vaikea havaita opportunistia [Wathne and Heide, 2000]. Informaation asymmetriaa voidaan pitää juurisyynä opportunistiseen käytökseen tilaaja-toimittaja – yhteistyössä [Dawson et al., 2011].

Opportunismin klassinen määritelmä liiketoiminnassa on peräisin jo 1970-luvulta: oman edun tavoittelua kavaluudella (eng. *guile*) [Williamson, 1975]. Williamson [1985] on myöhemmin kuvannut käyttämänsä sanan ”kavaluus” sisältävän seuraavia elementtejä: valehtelua, varastamista, huijaamista, aktiivisia toimia toisen harhaanjohtamiseksi, väärentelyä, väärentämistä tai yleensä mitään toimia kauppakumppanin hämäämiseksi. Myöhemmin opportunistia on edelleen pilkottu osiin erottelemalla toisistaan aktiivinen ja passiivinen opportunisti [Wathne and Heide, 2000]. Ensimmäinen tarkoittaa esimerkiksi suoraa valehtelua ja toinen, eli passiivinen opportunisti, voi ilmetä muun muassa tiedon salaamisena.

Pyrkimys kauppakumppanin vaihtoehtojen vähentämiseen toimittajalukit-

semisen keinoin voidaan helposti tulkita opportunistiseksi toiminnaksi. Myös toimittajalukkiutumisen mahdollistama ylihinnoittelu on opportunistisia [Clemons and Chen, 2011], mutta ylihinnoittelun mahdollistava tekijä on lopulta toimittajalukkiutuminen. Wathne ja Heide [2000] muotoilevatkin, että toimittajalukkiutuminen lisää yrityksen opportunistismin sietokykyä. Toisin sanoen se pakottaa yrityksen sietämään opportunistisia.

Teknistä yksittäistä syytä, miksi monimutkaiset tietojärjestelmät ovat usein huonosti yhteensopivia, on käytännössä mahdotonta antaa. Voidaan spekuloida, että informaatioteknologiat ovat luonteeltaan erittäin monimutkaisia ja ennen kaikkea moninaisia järjestelmiä, joissa sama asia voidaan toteuttaa hyvin usealla erilaisella tavalla. Lisäksi ala on suhteellisen nuori, joten käytäntöjen vakiinnuttaminen on vielä toistaiseksi kesken.

Esimerkiksi seuraavat tietojärjestelmähankinnan erityispiirteet aiheuttavat toimittajalukkiutumista ja korostavat sen haittoja:

- Tilaaajaorganisaatioiden asiantuntijuuden puute tietojärjestelmäkehityksestä ja yleisesti informatiivinen asymmetria tilaajan ja toimittajan välillä. Tästä seuraa myös riski toimittajan opportunistiselle käytökselle.
- Eri tietojärjestelmien yhteensopimattomuus ja standardien puute.

2.4. Toimittajalukkiutumisen vaikutukset

Jo vuonna 1998 Shapiro ja Varian kirjoittivat, että tällä informaation aikakaudella suuret rikkauudet ovat niiden yhtiöiden käsissä, jotka onnistuvat vakiinnuttamaan suljetun järjestelmäarkkitehtuurin, jolla on laaja pohja toimittajalukkiutuneita asiakkaita. Nykyään eläviä esimerkkejä tällaisista hyvin menestyvistä yhtiöistä ovat Apple ja Google, jotka ovat molemmat onnistuneet luomaan suljetun koodin ohjelmistoekosysteemit, joilla on erittäin laajat käyttäjäpohjat. Toisaalta informaatioajan suurimmat ongelmat ovat yhtiöillä, jotka ovat lukkiutuneet kilpailukyvyttömiin, hylättyihin tai monopolistisesti tuettuihin järjestelmiin [Shapiro and Varian, 1998].

Toimittajalukkiutumisesta seuraava perustavaa laatua oleva ongelma on riippuvuussuhde toimittajaan, jolloin tilaajaorganisaatio menettää avoimet mahdollisuutensa kilpailluilla markkinoilla. Riippuvaisella tilaajaorganisaatiolla on kaikin puolin hyvin epäedullinen asema määräävässä asemassa olevaan toimittajaan nähden [Shepherd, 1999]. Esimerkiksi yhteen toimittajaan lukkiutunut tilaaja on altis toimittajan opportunistiselle hinnoittelupolitiikalle [Shepherd, 1999; Davis et al., 2006; Chen and Clemons, 2011; Zhu and Zhou, 2011] sekä alentuneelle palvelun tasolle [Shepherd, 1999]. Toimittaja voi hyväksikäyttää tilannetta myös pakkomyymällä tilaajalle uusia versioita sillä uhalla, että tilaajan nykyinen järjestelmä jää tulevaisuudessa ilman teknistä tukea ja lisäpäivityksiä [Zhu and Zhou, 2012].

Toimittajaansa sidoksissa olevan yrityksen voi olla vaikeampi muuttaa tuotettaan lyhyessä ajassa. Tämä voi muodostua ongelmaksi, sillä globaalissa kilpailussa kyky uudistua ja muuttaa palveluitaan muuttuvien kuluttajatottumusten mukana on yrityksen menestyksen kannalta tärkeää [Eisenhardt and Martin, 2000]. Yritys voi esimerkiksi tarvita toiminnallista päivitystä tietojärjestelmäänsä, jota järjestelmän toimittaja ei syystä tai toisesta pysty toteuttamaan. Tilaajaorganisaatiolle jää näin vaihtoehtoiksi kohdata markkinat heikommalla kilpailukyvyllä tai hankkia uusi toimittaja ja kohdata vaihtokustannukset.

Toimittajan näkökulmasta toimittajalukkiutumisessa voidaan nähdä huomattaviakin etuja. Usein asiakkaiden lukitseminen on valinnainen strategia [Pynnönen, 2008; Zhou and Zhu, 2011]. Tiukassa globaalissa kilpailussa yritysten on löydettävä keinoja saavuttaakseen asiakkaiden lojaalius ja tietynlainen lukitseminen voi olla hyvä keino vakiinnuttaa tällainen asiakaspohja [Pynnönen, 2008]. Tilaajaorganisaatioiden onkin hyvä tiedostaa, että vaikka kaikkien järjestelmätoimittajien strategiaan ei kuulu aggressiivinen toimittajalukitseminen, ne tuskin kuitenkaan varsinaisesti yrittävät välttää tällaista tilannetta. Näin ollen toimittajalukkiutuminen ja sen seurausten lieventäminen on yleensä yksinomaan tilaajaorganisaation vastuulla.

Yhteenvetona toimittajalukkiutumisen aiheuttamista riskeistä tilaajaorganisaation kannalta voidaan listata seuraavat tekijät:

- Yritys kohtaa kahdenvälisen monopolin ja sen mukaisen hinnoittelun sekä laadun heikentymisen markkinoillaan.
- Yrityksen kyky muuntautua ja reagoida markkinoihin heikentyy.
- Yleinen riippuvuussuhde toimittajaan, jolloin omien yleisten liiketoimintariskien ohella myös toimittajan liiketoimintariskit vaikuttavat omaan toimintaan.

3. Toimittajalukkiutumisen hallinta

3.1. Vaihtokustannusten minimointi

Vaihtokustannukset ovat normi tietojärjestelmähankinnan alalla [Shapiro and Varian, 1998]. Koska toimittajalukkiutuminen johtuu vaihtokustannuksista, paras tapa välttää toimittajalukkiutuminen on yrittää pitää tietojärjestelmien ja ohjelmiston vaihtokustannukset mahdollisimman pienenä. Kohdassa 2.2. määrittelimme yhdeksän erilaista vaihtokustannustyyppiä.

1. Jo käytetyt panostukset (eng. sunk costs). Kuinka syvästi yrityksen kannattaa sitoutua käyttämäänsä järjestelmään?
2. *Saavutettujen etujen menettäminen*. Saavutetut edut voivat todellakin olla molempia osapuolia hyödyttäviä, joten niistä luopumista tuleekin harkita tarkkaan.

3. *Uuden järjestelmän aiheuttamat hallinnointikulut.* Toimittajalukkiutuminen voidaan ottaa huomioon siis myös yrityksen hallintorakenteen suunnittelussa.
4. *Epävarmuustekijät.* Näitä voi lieventää järkevällä ja järjestelmällisellä vaihtoehtojen arvioinnilla [Fichman et al., 2005].
5. *Menetetty työskentelytehokkuus ja koulutuskustannukset.* Intuitiivisesti voidaan ajatella järjestelmän käytettävyyden lieventävän näitä kustannuksia.
6. *Henkilöstönvaihtokulut.* Tämäkin kulu on hyvä ottaa huomioon, mutta on melko hankala välttää.
7. *Sopimusjärjestelyt.* Aiheesta lisää kohdassa 3.2.
8. *Vanhan järjestelmän alasajo, uuden asennus sekä tietojen siirto.* Tietojärjestelmähankinnassa tämä saattaa olla suurin ja merkittävin yksittäinen menoerä. Tehokas projektinhallinta on ensiarvoisen tärkeää sekä standardien ja avoimen lähdekoodin käyttö voivat olla avainasemassa. Avoimia standardeja ja avointa lähdekoodia käsitellään pintapuolisesti kohdassa 3.4. Tehokasta projektinhallintaa ei tämän tutkimuksen rajoissa käsitellä tämän enempää.
9. *Uuden toimittajan etsimiskustannukset.* Tämäkin kulu on hyvä ottaa huomioon, mutta melko hankala välttää.

Vaihtokustannusten ottaminen huomioon ja minimointi on yritykselle ensiarvoisen tärkeää, kun se tekee arvioita uusista tietojärjestelmähankinnoista. Kaikkien kustannustekijöiden yksityiskohtainen arviointi ei ole tämän tutkimuksen rajoissa mahdollista. Huomaamme kuitenkin listasta, että vaihtokustannusten huomiointi on yrityksen toiminnan kannalta kokonaisvaltaista.

3.2. Sopimusjärjestelyt

Yritysten välisen yhteistyön ensimmäinen vaihe on sopimusneuvottelu. Tämä on myös ensimmäinen vaihe, jolloin tietojärjestelmää tilaavan yrityksen on mahdollista vaikuttaa riippuvuuteensa tulevasta toimittajasta. Toisin sanoen, toimittajalukkiutumisen hallinta lähtee liikkeelle sopimusneuvotteluista. Yksinkertaisin tapa lukkiutua toimittajaan on luonnollisesti sitova sopimus toimittajan kanssa. Sopimusten luonteeseen tietysti kuuluu jo lähtökohtaisesti tietty sitoutuminen, mutta tuleviin vaihtokustannuksiin ja lukkiutumisesta seuraaviin kustannuksiin voidaan vaikuttaa jo tässä vaiheessa.

Sopimuksissa määritellään palvelun ja tuotteen sisältö ja hinta. Tietojärjestelmähankinnan yhteydessä usein määritellään myös järjestelmän ylläpitokustannuksiin liittyviä palvelumaksuja ja millaisia ylläpitopalveluja toimittaja lupaa tarjota. Shapiro ja Varian [1998] painottavat, että toimittajalukkiutumisen kustannuksia on tehokkainta vähentää jo ennen lukkiutumista. Parantaakseen neuvotteluasemiaan hankintaa tekevän yrityksen on myös kannattavaa pitää itsensä houkuttelevana asiakkaana ja vähätellä omia vaihtokustannuksiaan neuvotteluosapuolelle [Shapiro and Varian, 1998]. Käytännössä siis ei ole vii-

sasta tuoda esiin riippuvuuden tasoa toimittajasta.

Viimeisenä tapana tilaava yritys voi käyttää hyväkseen mahdollista toimittajalukkiutumistaan kompensoidakseen myöhemmin tulevia kustannuksia toimittajalukkiutumisesta. Tämä on mahdollista, koska toimittajaosapuoli voi laskea hyötывänsä lukitusta asiakkaasta [Pynnönen, 2008; Zhou and Zhu, 2011]. Oleellista on tiedostaa, että yrityksen ei tulisi lukita itseään toimittajaan koskaan ilmaiseksi, vaan pyrkiä hyötymään tilanteesta parempien sopimusehtojen toivossa.

Intuitiivisesti yksinkertaisin ratkaisu opportunistisen hinnankorotuksen estämiseksi olisi sopia tarkasti myös tulevaisuuden hinnoittelusta jo sopimusta tehtäessä. Ongelmaksi kuitenkin muodostuu, että tarkalle tasolle määrätty hinnoittelu vanhenee nopeasti [Shepherd, 1999]. Ratkaisuksi Shepherd [1999] ehdottaa mallia, joka ottaa huomioon kustannustason ja sisältää samalla tulospalkkauselementin. Palvelutason ylläpitämiseksi Shepherd [1999] sen sijaan suosittelee vaatimaan toimittajalta yhteisesti hyväksyttyä ja seurattavaa laadunmittausmekanismia. Lisäksi Shepherd [1999] muistuttaa sopimuksen lopettamisen yhteydessä jaettavista velvollisuuksista sopimuskumppanien kesken. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi väliaikaiseen ylläpitoon liittyviä velvollisuuksia, mikäli palvelu ulkoistetaan toiselle toimittajalle, tai muita sopimuksen katketessa syntyviä ristiriitoja.

Sopimuksen kesto on myös yksi sopimustekninen tekijä. Vaihtokustannuksella on tapana nousta ajan kanssa [Shapiro and Varian, 1998]. Tämä johtuu siitä, että datan kertyminen (ajan myötä) järjestelmään nostaa datan siirtämisestä seuraavia kuluja. Lisäksi henkilökunnan koulutuskustannukset usein nousevat, kun vaihdetaan kauan käytössä ollut järjestelmä uuteen [Shapiro and Varian, 1998]. Lisäksi toimittajasuhteeseen panostetuilla resursseilla on havaittu olevan vaikutusta yrityksen haluun vaihtaa toimittajaa [Whitten et al., 2010]. Panostetut resurssit kumuloituvat ajan myötä. Huomaamme siis, että pitkä sopimusaika nostaa riskiä toimittajalukkiutumiseen ja voi nostaa toimittajalukkiutumisen kustannuksia.

3.3. Escrow-menetelmä

Yksi toimittajalukkiutumisen riskeistä on jaettu riski toimittajan omien liiketoimintariskien muodossa. Käytännössä siis toimittajalukkiutunut yritys voi joutua ongelmiin, mikäli tietojärjestelmää ylläpitävä tai toimittava yritys ajautuu konkurssiin tai rikkoo osansa sopimuksesta. Tämän riskin lieventämiseen voidaan käyttää niin kutsuttua lähdekoodin escrow-menetelmää. Järjestely tarkoittaa käytännössä sitä, että toimittaja antaa tietojärjestelmän lähdekoodin jollekin kolmannelle osapuolelle säilytettäväksi, joka tarvittavien ehtojen toteutuessa voi luovuttaa lähdekoodin asiakasyrityksen haltuun. Esimerkiksi tilan-

teessa, jossa toimittava yritys ajautuu vararikkoon, asiakasyritys saa toimitetun tietojärjestelmän lähdekoodin haltuunsa, mikä mahdollistaa järjestelmän ylläpidon ja jatkokehityksen. [Freeman, 2004]

Menetelmän käyttökelpoisuudesta ollaan montaa mieltä. Escrow-menetelmän puolestapuhujien mukaan menetelmä on edullinen ja toimiva tapa suojata asiakasyrityksen intressejä. Kritiikkinä on esitetty, että menetelmä on usein turha ja kallis tapa, koska talletettavan koodin ja sen dokumentoinnin laadusta ei voida olla varmoja. Toiseksi asiakasyrityksellä ei välttämättä ole kykyä käyttää hyväkseen saamaansa lähdekoodia. Puutteistaan huolimatta oikeissa olosuhteissa ja järkevästi määritellyillä ehdoilla lähdekoodin escrow-menetelmä on osoittautunut käyttökelpoiseksi tavaksi suojata asiakasyrityksiä ulkoistamisen riskeiltä. [Freeman, 2004]

Escrow-menetelmän toimivuutta tukee havainto, että joskus asiakasyrityksen voi olla järkevää vaatia lähdekoodia haltuunsa suoraan sopimuksen yhteydessä. Sledgianowski ja muut [2008] kuvaavat tapauksen, jossa asiakasyritys toteutti menestyksekkäästi ulkoistetun tietojärjestelmäprojektin, jossa lähdekoodi säilyi koko ajan asiakkaan hallussa.

3.4. Opportunismien hallinta

Opportunismien ja toimittajalukkiutumisen välillä ei ole kovin selkeää syyseuraus-suhdetta. Toisaalta tiedon salaaminen, jonka voidaan ajatella johtavan toimittajalukkiutumiseen, on yksi opportunistisen käytöksen tunnusmerkeistä [Wathne and Heide, 2000]. Toisaalta taas toimittajalukkiutuminen mahdollistaa opportunistisen hinnoittelupolitiikan [Clemons and Chen, 2011], jolloin opportunistinen käytös on mahdollistunut toimittajalukkiutumisen myötä. Molemissa tilanteissa kuitenkin opportunistilla on vaikutusta, joko riskiin toimittajalukkiutua tai toimittajalukkiutumisen riskiin, joten voitaneen sanoa, että opportunistinen toiminta lisää toimittajalukkiutumisen riskejä.

Wathne ja Heide [2000] tarjoavat opportunistien hallintaan neljä erilaista metodia:

1. Partnerin monitorointi eli partnerin toiminnan tarkka valvominen. Tämä metodi auttaa lieventämään informaation asymmetriaa, mutta ei auta enää mitenkään jo toimittajalukkiutuneessa tilanteessa.
2. Erilaiset palkkiomekanismit, joiden tarkoitus on tehdä opportunistista toimintaa vähemmän houkuttelevaksi.
3. Partnerin tarkka valikointi eli yhteistyökumppania etsittäessä valikoidaan mahdollisimman riskitön vaihtoehto.
4. ”Sosialisointi” (eng. *socialization*) tarkoittaa tässä yhteydessä opportunistiriskien minimoimista sosiaalisin keinoin. Tarkoituksena on luoda yhteisiä tavoitteita ja päämääriä yhteistyökumppaneiden kanssa. Näin voidaan vähen-

tää opportunistin riskiä ja lisätä sitoutuneisuutta yhteisiin tavoitteisiin.

Yhteenvedossaan Wathne ja Heide [2000] kuitenkin toteavat, että näiden metodien toteuttaminen aiheuttaa kustannuksia, jotka eivät aina maksa itseään takaisin. Yritysten tulisi tarkkaan harkita, milloin opportunistin ehkäiseminen on kannattavaa ja milloin on kannattavampaa vain sietää sitä [Wathne and Heide, 2000].

Sopimusneuvotteluihin liittyvällä sopimuksen muodollisuuden ja tarkkuuden asteella on havaittu olevan monisyisiä vaikutuksia osapuolten väliseen yhteistyöhön. Liian yksityiskohtaisen sopimuksen voidaan ajatella kertovan epäluottamuksesta osapuolten välillä, ja tämän on todettu lisäävän opportunistisen toiminnan riskiä [Aubert et al., 2003]. Wuyts ja Geyskens [2005] tarkentavat tätä vielä havainnolla, että tarkasta sopimuksesta syntyy haittaa etenkin, kun sopivat osapuolet ovat ennestään tuttuja ja jakavat yhteisiä sosiaalisia kontakteja jo valmiiksi. Sen sijaan tarkasta sopimuksesta on ollut opportunistisia vähentävä vaikutus, kun sopimusosapuolet ovat olleet vieraita keskenään, eikä luottamuselementtiä ole ollut valmiina rikottavaksi [Wuyts and Geyskens, 2005].

On olemassa myös erittäin onnistuneita tietojärjestelmähankkeita, joissa muodollista sopimusta ei ole tehty lainkaan, vaan kehitystyö tehtiin läheisen yhteistyön ja luottamuksen hengessä [Sledgianowski et al., 2008]. Myös Shepherdin päätelmät [1999] tukevat ajatusta, että läheisellä yhteistyöllä ja sosiaalisilla kontakteilla on loppujen lopuksi eniten vaikutusta opportunistisen toiminnan kitkemisessä ja yleisesti positiivinen vaikutus ulkoistetun projektin onnistumiseen. Wang ja muut [2013] havaitsivat myös, että sosiaalisella pääomalla on suora negatiivinen vaikutus opportunistiseen käytökseen. Sosiaalinen pääoma on moninainen ja vaikeasti määriteltävissä oleva käsite, mutta karkeasti ottaen sillä tarkoitetaan yrityksen aineettomia sosiaalisia resursseja ja vaikutusvaltaa [Wang et al., 2013].

Tietojärjestelmän hankkija voi vähentää riskiään myös hajauttamalla ostamansa tietojärjestelmät tai palvelut useammalle eri toimittajalle [Shapiro and Varian, 1998; Gallivan and Oh, 1999]. Tämä auttaa ylläpitämään avointa kilpailua toimittajien välillä ja vähentämään opportunistisen toiminnan ja toimittajalukkiutumisen riskiä. Kääntöpuolena sopimusten ja tehtävien koordinoiminen saattaa aiheuttaa lisää hallinnointikuluja [Gallivan and Oh, 1999]. Vaikutus perustuu eri toimittajien väliseen jatkuvaan kilpailutilanteeseen.

3.5. Avoin lähdekoodi ja avoimet standardit

Esitimme kohdassa 2.3. suljetun lähdekoodin ongelman. Ratkaisuna ongelmaan on olemassa standardeja, jotka itsessään voivat olla avoimia tai suljettuja sekä avoimen lähdekoodin ohjelmistoja, joiden lähdekoodi on yleisesti kaikkien

saatavilla ja tarkasteltavissa. Avoimen lähdekoodin käyttöoikeudet riippuvat käytetyistä lisensseistä.

Standardi on joukko teknisiä määritelmiä, jotka ovat syntyneet joko ikään kuin itsestään tai standardin luoja on ne tietoisesti määritellyt. Toisin sanoen standardi on tietty tapa tai tekniikka toteuttaa jokin tietty tehtävä tai asia. Standardi on suljettu, mikäli sen tuntevat ja sitä voivat käyttää vain tietyn sisäryhmän (esimerkiksi yrityksen) jäsenet. Standardia kutsutaan avoimeksi, kun se on kehitetty avoimen yhteisön toimesta ja sen sisältö on avoin kaikille toimijoille. [David and Greenstein, 1990]

Avoimet standardit ja lähdekoodi ovat tehokkain tapa vastaamaan vaihtokustannuksien pienentämisestä datan muuntamisen ja siirtämisen osalta. Järjestelmä, joka perustuu avoimeen lähdekoodiin tai avoimille standardeille, on lähtökohtaisesti myös muiden kuin ohjelmiston varsinaisen kehittäjän muokattavissa ja kehitettävissä. Esimerkiksi siirrettäessä tietoa vanhasta tietokannasta uuteen järjestelmään avoimen standardin mukaisesti toteutettu vanha ratkaisu mahdollistaa avoimen kilpailun uuden järjestelmän suhteen. Tämän vuoksi vaatimalla toimittajalta avoimien standardien käyttöä voidaan toimittajalukkiutumisen riskiä vähentää [Shapiro and Varian, 1998; Clemons and Chen, 2011]. Avointa lähdekoodia kehittävän yhteisön sisällä oleva kilpailu laskee avoimien järjestelmien ylläpito- ja tukikustannuksia [Zhu and Zhou, 2012]. Computer Economicsin [2005] tekemän kyselyn mukaan kustannussäästöt eivät kuitenkaan ole avoimen lähdekoodin tärkein etu. Sen sijaan kyselyyn vastanneiden mielestä tärkein tekijä on riippuvuuden vähentäminen suljetun lähdekoodin ohjelmistoista ja niiden toimittajista.

4. Yhteenveto ja päätelmät

Kirjallisuuden perusteella havaittiin, että toimittajalukkiutuminen on tilanne, jossa vaihtokustannukset estävät tai vaikeuttavat yritystä vaihtamasta tietojärjestelmän toimittajaa. Näin yritysten välille muodostuu epäterve riippuvuustilanne, jossa toimittajaosapuolella on hallussaan kaikki neuvotteluedut. Mahdollisia haittavaikutuksia tilanteesta tilaajaorganisaatiolle ovat kasvava kustannustaso, palvelun laadun heikkeneminen, ketteryyden ja muuntautumiskyvyn menetys ja jaetut (lisääntyneet) riskit toimittajan kanssa.

Toimittajalukkiutumisen erityisen riskin tietojärjestelmähankinnassa aiheuttaa pohjimmiltaan alan tekninen ja monimutkainen luonne. Kirjallisuudesta voitiin nostaa kaksi eri syytä, jotka molemmat ovat seurausta edellä mainitusta: tilaajien heikko alan tuntemus sekä standardoinnin puutteet. Ensimmäisestä syystä seuraa vaikeuksia tilaajan ja toimittajan väliseen yhteistyöhön sekä toimittajan opportunistisen toiminnan riski lisääntyy. Standardoinnin, eli yhdenmukaistamisen, puutteet johtuvat muun muassa alan monimutkaisuudesta ja

teknisestä luonteesta, mutta myös alan yritysten tahdottomuudesta luoda yhteisiä käytäntöjä. Tähän ovat syynä liiketaloudelliset seikat – keskenään yhteensopivien ohjelmistojen tuottamista ei pidetä strategisesti viisaana.

Vaihtokustannukset ovat tietojärjestelmähankinnassa tietynlainen normi, joita ei voida täydellisesti poistaa. Niiden hallinta on silti yrityksen kannalta merkittävää, sillä pahimmillaan toimittajalukkiutuminen voi tuhota yrityksen kilpailukyvyn kokonaan. Vaihtokustannukset muodostuvat monesta tekijästä ja niiden hallinta vaatii kokonaisvaltaista strategista valvettavuutta. Erityisesti sopimusjärjestelyillä voidaan vaikuttaa merkittävästi toimittajalukkiutumisen haittavaikutuksiin sekä strategisista valinnoista avoimien standardien ohjelmistojen käytöllä on todettu olevan vaihtokustannuksia vähentäviä vaikutuksia.

Tutkimuksen suurin puute on varmasti järjestelmällisyyden puute ja riski, että osa aiheesta käsittelevästä kirjallisuudesta on voinut jäädä käsittelemättä. Tutkimusta hankaloitti myös se, että aihepiiriä ei ole tietokantahakujen perusteella tutkittu erityisen paljon. Toisin sanoen nimenomaan toimittajalukkiutumista käsitteleviä artikkeleita löytyi hyvin vähän, mutta toisaalta asiaa sivutaan melko paljon. Tämän takia voidaan pitää arvokkaana saada kootuksi toimittajalukkiutumista käsitteleviä huomioita laajemmin yhteen ja samaan tutkimukseen.

Suhteellisenä ja ei-mitattavana ilmiönä toimittajalukkiutuminen on haastava tutkimuskohde. Siinäkin mielessä tutkimuksen tieteellinen arvo on rajallinen, sillä mitään mitattavaa faktatietoa tai analysoitavaa ei ollut mahdollista tuottaa. Tavoitteena kuitenkin oli tuottaa jonkinlainen yhteenveto toimittajalukkiutumisesta ja sen ominaisuuksista kirjallisuuden perusteella.

Tutkimuksen perusteella arviot toimittajalukkiutumisen vaikutuksista kirjallisuudessa tukevat Celkeen ja muiden [2013] huolta suomalaisten tietojärjestelmähankkijoiden merkittävästä määrästä, jotka eivät ota huomioon toimittajalukkiutumista. Lisäksi tulokset kannustavat myös toimittajalukkiutumisen ja vaihtokustannusten laajaan huomioonottamiseen yritysten strategisia valintoja tehtäessä. Tutkimus ei tosin ota kantaa siihen, kuinka hyvin yritykset jo toteuttavat tätä ohjetta. Toisaalta mikäli vain vajaa puolet suomalaisista yrityksistä ottaa toimittajalukkiutumisen huomioon tehdessään tietojärjestelmähankintoja [Celkee et al., 2013], voidaan ajatella, etteivät loput yritykset ota ilmiötä erityisen hyvin huomioon muussakaan toiminnassaan. Väite jää kuitenkin spekulatiiviselle tasolle ilman asiallista jatkotutkimusta.

Tutkimus myös tukee entisestään avoimen lähdekoodin ja avoimen standardien kehityksen tarpeellisuutta ja ohjelmistojen ja järjestelmien yhteensopivuuden edistämistä. Voisikin olla tarpeellista tutkia, millaisia säästöjä kansantaloudellisesti olisi mahdollista saavuttaa, mikäli avoimen lähdekoodin ja avoimien standardien käyttöönottoa edistettäisiin entistä aktiivisemmin.

Viiteluettelo

- [Alaranta and Jarvenpaa, 2010] Maria Alaranta and Sirkka L. Jarvenpaa, Changing IT providers in public sector outsourcing: managing the loss of experiential knowledge, In: *Proc. of the 43th Hawaii International Conference on System Sciences*, 1-10.
- [Aubert et al., 2003] Benoit Aubert, Jean-Francois Houde, Michel Patry and Suzanne Rivard, Characteristics of IT outsourcing contracts. In: *Proc. of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences* 1-9.
- [Celkee et al., 2013] Celkee Oy, Tietotekniikan liitto ry. ja Ohjelmistoyrittäjät ry. Tietojärjestelmien hankinta Suomessa 2013 (24.5.2013).
- [Clemons and Chen, 2011] Eric K. Clemons and Yuanyuan Chen, Making the Decision to Contract for Cloud Services: Managing the Risk of an Extreme Form of IT Outsourcing. In: *Proc. of the 44th Hawaii International Conference on System Sciences*, 1-10.
- [Computer Economics, 2005] Key advantage of open source is not cost savings. Computer Economics, <http://www.computereconomics.com/article.cfm?id=1043>, checked 13.5.2014.
- [David and Greenstein, 1990] Paul A. David and Shane Greenstein, The Economics of Compatibility Standards: An Introduction to Recent Research. *The Economics of Innovations and New Technology* 1 (1990), 3-41.
- [Dawson et al., 2011] Gregory S. Dawson, Richard T. Watson and Marie-Claude Boudreau, Information Asymmetry in IS Consulting: Towards a Theory of Relationship Constraints. *Journal of Management Information Systems* 27, 3 (Winter 2010-11), 143-178.
- [Dibbern et al., 2004] Jens Dibbern, Tim Goles, Rudy Hirschheim and Bandula Jayatilaka, Information systems outsourcing: A survey and analysis of the literature, *The DATA BASE for Advances in Information Systems*, 35, 4 (Fall 2004), 6-102.
- [Eisenhardt and Martin, 2000] Kathleen M. Eisenhardt and Jeffrey A. Martin, Dynamic capabilities: What are they? *Strategic Management Journal* 21 (2000), 1105-1121.
- [Fichman et al., 2005] Robert G. Fichman, Mark Keil and Amrit Tiwana, Beyond valuation: "Options thinking" in IT project management. *California Management Review*, 47, 2 (Winter 2005), 74-96.
- [Freeman, 2004] Edward H. Freeman, Source code escrow, *Information Systems Security: Legally Speaking* (March/April 2004), 8-11.
- [Gallivan and Oh, 1999] Michael J. Gallivan and Wonseok Oh, Analyzing IT Outsourcing Relationships as Alliances among Multiple Clients and Vendors. In: *Proc. of the 32nd Hawaii International Conference on System*

Sciences, 1-15.

- [Greenstein, 1997] Shane M. Greenstein, Lock-in and the costs of switching mainframe computer vendors: What do buyers see? *Industrial and Corporate Change* 6, 2 (1997), 247-273.
- [Jones et al., 2002] Michael A. Jones, David L. Mothersbaugh and Sharon E. Beatty, Why customers stay: measuring the underlying dimensions of services switching costs and managing their differential strategic outcomes. *Journal of Business Research* 55, 6 (June 2002), 441–450.
- [Kim, 2011] Hee-Woong Kim, The Effects of switching costs on user resistance to enterprise systems implementation. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 58, 3 (August 2011), 471-482.
- [Ohio Department of Public Safety, 2012] Ohio Department of Public Safety - Information Technology Office, Exodus Project - Pigs Really Do Fly! - A detailed account of the Ohio Department of Public Safety's journey to decommission and replace its mainframe technology. Ohio Department of Public Safety - Information Technology Office (August 2012).
- [Pynnönen, 2008] Mikko Pynnönen, Customer Lock-In in ICT Services Business: Designing and Managing Customer Driven Business Model. In: *Proc. of PICMET 2008*, 27-31.
- [Razavian et al., 2013] Seyed Majid Razavian, Hadi Khani, Nasser Yazdani and Fatemeh Ghassemi, An analysis of vendor lock-in problem in cloud storage. In: *Proc. of the 3rd International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE 2013)* 331-335.
- [Salminen, 2011] Ari Salminen, Mikä kirjallisuuskatsaus? Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyyppeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin. Vaasan yliopiston julkaisuja, Opetusjulkaisuja 62, Julkisohtaminen 4 (2011).
- [Satzger et al., 2013] Benjamin Satzger, Waldemar Hummer, Christian Inzinger, Philipp Leitner and Schahram Dustar, Winds of change: From vendor lock-in to the meta cloud. *View from the Cloud* (January/February 2013), 69-73.
- [Shapiro and Varian, 1998] Carl Shapiro and Hal R. Varian, *Information Rules: A Strategic Guide to the Network Economy*, Harvard Business School Press, 1998.
- [Shapiro and Varian, 1999] Carl Shapiro and Hal R. Varian, The art of standards wars. *California Management Review*, 41, 2 (Winter 1999), 8-32.
- [Shepherd, 1999] Alan Shepherd, Outsourcing IT in a changing world, *European Management Journal* 17, 1 (1999), 64-84.
- [Sledgianowski et al., 2008] Deb Sledgianowski, Mohammed H.A. Tafti and Jim Kierstead, SME ERP system sourcing strategies: A case study. *Industrial Management & Data Systems* 108, 4 (2008), 421-436.

- [Wang et al., 2013] Qiong Wang, Julie Juan Li, William T. Ross Jr. and Christopher W. Craighead, The interplay of drivers and deterrents of opportunism in buyer–supplier relationships. *Journal of the Academy of Marketing Science* **41** (2013), 111–131.
- [Wathne and Heide, 2000] Kenneth H. Wathne and Jan B. Heide, Opportunism in interfirm relationships: forms, outcomes, and solutions. *Journal of Marketing* **64**, (October 2000), 36–51.
- [Whitten et al., 2010] Dwayne Whitten, Subrata Chakrabarty and Robin Wakefield, The strategic choice to continue outsourcing, switch vendors, or backsource: Do switching costs matter? *Information and Management* **47**, 3 (April 2010), 167–175.
- [Williamson, 1975] Oliver E. Williamson, *Markets and Hierarchies: Analysis and Antitrust Implications*. New York: The Free Press, 1975. (Lähdettä ei saatu hankittua, joten siihen viitataan epäsuorasti viitteen [Wathne and Heide, 2000] kautta.)
- [Williamson, 1985] Oliver E. Williamson, *The Economic Institutions of Capitalism*. New York: The Free Press, 1985. (Lähdettä ei saatu hankittua, joten siihen viitataan epäsuorasti viitteen [Wathne and Heide, 2000] kautta.)
- [Wuyts and Geyskens, 2005] Stefan Wuyts and Inge Geyskens, The Formation of Buyer–Supplier Relationships: Detailed Contract Drafting and Close Partner Selection. *Journal of Marketing* **69** (October 2005), 103–117.
- [Zhu et al., 2006] Kevin Zhu, Kenneth L. Kraemer, Vijay Gurbaxani and Sean Xu, Migration to open-standard interorganizational systems: Network effects, switching costs, and path dependency. *MIS Quarterly* **30** (2006), 515–539.
- [Zhu and Zhou, 2012] Kevin Xiaoguo Zhu and Zach Zhizhong Zhou, Lock-In Strategy in Software Competition: Open-Source Software vs. Proprietary Software. *Information Systems Research* **23**, 2 (June 2012), 536–545.